



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**LETECKÝ ÚSTAV**

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**MĚŘENÍ PARAMETRŮ POHONNÝCH SYSTÉMŮ  
PRO BEZPILOTNÍ PROSTŘEDKY**

UNMANNED AIRCRAFT POWERTRAIN CHARACTERIZATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Vadym Serediuk**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Dvořák**

**BRNO 2018**



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Vadym Serediuk**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Dvořák**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Měření parametrů pohonných systémů pro bezpilotní prostředky

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V souvislosti s prudkým rozvojem bezpilotních leteckých prostředků pro civilní použití je kladen vzrůstající tlak na jejich užité vlastnosti jako je dolet a vytrvalost. Smyslem práce je provést sérii experimentů v aerodynamickém tunelu Leteckého ústavu, při nichž budou charakterizovány vybrané pohonné systémy pro bezpilotní letouny. Součástí řešení je i návrh a realizace systému pro automatizované zpracování dat z měření. Na základě vyhodnocení charakteristik pohonů budou formulována doporučení pro instalaci nejvhodnější kombinace vrtule-motor do bezpilotního prostředku.

#### Cíle bakalářské práce:

- Přehled teoretických základů pro popis vrtulí a elektrických pohonných systémů
- Experimentální zjištění charakteristik pohonných systémů
- Návrh a realizace skriptu pro zpracování dat z měření
- Doporučení nejvhodnějšího pohonného systému

#### Seznam doporučené literatury:

DANĚK, V.: Mechanika letu. I, Letové výkony. Vydání první. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 293 stran, ilustrace. ISBN 978-80-7204-659-1.

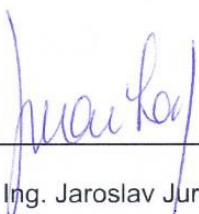
KIMBERLIN, R.D.: Flight testing of fixed-wing aircraft, Reston: AIAA American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, 441 s. ISBN 1563475642.

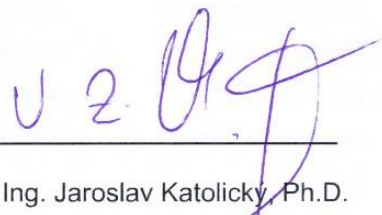
ŠOŠOVIČKA, R.: Metodika měření a vyhodnocování letových výkonů letounu. 2004, Brno: VUT FSI, 116 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 10. 11. 2017



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je doporučení nejvhodnější elektrické pohonné soustavy z hlediska její efektivity. Začátek práce je věnován rešerši oblasti elektrických pohonných soustav a popisu jejich hlavních parametrů. Následuje praktická část práce, která je rozdělena na dvě série měření. Nejprve je provedeno měření výkonnostních charakteristik různých kombinací motor-vrtule. Na základě obdržených dat je provedeno srovnání pohonných soustav z hlediska jejich efektivity a následně je doporučena nejvhodnější kombinace motor-vrtule. Poslední část se věnuje měření a následné vizualizaci rychlostního pole proudění vzduchu za vrtulí.

## Summary

The aim of this bachelor thesis is to recommend the most efficient electric propulsion system from the selected ones. The beginning is devoted to research in the field of electric propulsion systems and to description of their main parameters. The theoretical part is followed by a practical one, which is divided into two series of measurements. First, the performance characteristics of various motor-propeller combinations are measured. On the basis of the received data, a comparison of propulsion systems in terms of efficiency is made, the most suitable propeller-motor combination is recommended. The last part is devoted to the measurement and visualization of the airflow velocity field behind the propeller.

## Klíčová slova

Efektivita, elektrický pohonný systém, motor, vrtule, měření, aerodynamický tunel.

## Keywords

Efficiency, electric propulsion system, motor, propeller, measurement, aerodynamic tunnel.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím pouze vlastních znalostí a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

Vadym Serediuk





## Poděkování

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Dvořákovi za jeho cenné rady, podporu a trpělivost při vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům za možnost studovat na této vysoké škole a svému kamarádovi Bc. Petru Zemanovi za jeho výpomoc při provádění praktické části této práce.



# Obsah

1	Úvod .....	13
2	Elektrické pohonné soustavy .....	14
2.1	Motor .....	14
2.1.1	Popis .....	14
2.1.2	Charakteristika .....	15
2.2	Vrtule .....	16
2.2.1	Popis .....	16
2.2.2	Charakteristika .....	17
2.2.3	Základní vztahy .....	19
2.3	Další související prvky .....	20
3	Měření charakteristik pohonů .....	22
3.1	Využívané zařízení a software .....	23
3.1.1	Aerodynamický tunel .....	23
3.1.2	Měřicí stojan VUT STAND .....	24
3.1.3	Dewetron Minitaur 101, DeweSoft X2 .....	24
3.2	Měřené motory .....	25
3.3	Měřené vrtule .....	26
3.4	Postup .....	27
3.5	Zpracování dat v prostředí MATLAB .....	29
3.5.1	Návrh skriptů .....	30
3.5.2	Vyhodnocení výsledků .....	31
4	Doporučení nejvhodnějšího pohonného systému .....	39
5	Rychlostní pole za vrtulí .....	40
5.1	Podstata experimentu .....	40
5.2	Měřicí přístroje a zařízení .....	40
5.2.1	Traverzovací systém .....	40
5.2.2	Rychlostní sonda .....	41
5.3	Kalibrace rychlostní sondy .....	42
5.3.1	Návrh držáku .....	42
5.3.2	Postup kalibrace .....	44
5.3.3	Návrh skriptu v MATLAB pro zpracování dat .....	45
5.4	Postup měření .....	45
5.5	Zpracování dat, vyhodnocení výsledků .....	46
6	Závěr .....	49

7	Použité zdroje.....	50
7.1	Literární a internetové zdroje.....	50
7.2	Obrazová dokumentace .....	51
8	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	52
9	Seznam příloh .....	52
10	Přílohy.....	52
A.	CD.....	52
B.	Specifikace motorů .....	53
C.	Grafy závislosti efektivity na tahu pro vybrané kombinace. ....	54

# 1 Úvod

V dnešní době využití bezpilotních leteckých prostředků prudce stoupá. Díky širokému spektru možností použití se uplatňují v mnoha oblastech od zemědělství až po vojenské využití. Velký úspěch bezpilotních prostředků je ve značné míře zásluhou prudkého vývoje řídicích systémů a elektronických prvků (zejména motorů a akumulátorů), k němuž v relativně nedávné minulosti došlo.

V rámci tématu bezpilotních leteckých prostředků jsou v této práci použity následující pojmy:

- Bepilotní letadlo (z angl. *Unmanned Aircraft, UA*) – letadlo určené k provozu bez pilota na palubě. Většinou je součástí bezpilotního systému. [1]
- Bepilotní systém (z angl. *Unmanned Aircraft System, UAS*) – Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu. [1]
- Multikoptéra (z angl. *multicopter*) – letající dopravní prostředek s více než dvěma rotory. Často se místo předpony „multi-“ přímo označuje počet rotorů (například quadrocopter značí multicopter se čtyřmi rotory).

Většina současných bezpilotních letadel používá elektrické motory v kombinaci s vrtulí pro vytváření tahu, díky jejich vysoké účinnosti a obrovské variabilitě sestav. Snahou jak výrobců, tak i provozovatelů bezpilotních letadel je docílit co největší efektivity UA vzhledem k nastaveným cílům. Pro mnoho aplikací je kladen důraz nejen na vlastnosti letounu, jako jsou nosnost nebo jeho rozměry, ale i na dolet a vytrvalost. Jednou z možností, jak ovlivnit výslednou efektivitu bezpilotního letadla, je právě vhodná volba pohonné soustavy.

Bakalářská práce se zabývá experimentálním zjištěním charakteristik vybraných motorů a vrtulí. Na jejich bázi budou formulována doporučení pro instalaci nejvhodnější kombinace vrtule-motor do letadla bezpilotního systému VUT 714.

## 2 Elektrické pohonné soustavy

Většina současných bezpilotních prostředků (jak soukromých, tak i komerčních) využívá pro vytváření tahu vrtuli poháněnou elektrickým motorem. V této kapitole bude proveden popis jejich základních charakteristik a parametrů.

### 2.1 Motor

Motor přeměňuje elektrickou energii na mechanickou energii rotoru. V současné době se u bezpilotních letadel používají ve valné většině tzv. bezkartáčové stejnosměrné elektromotory (BLDC - Brushless Direct Current).

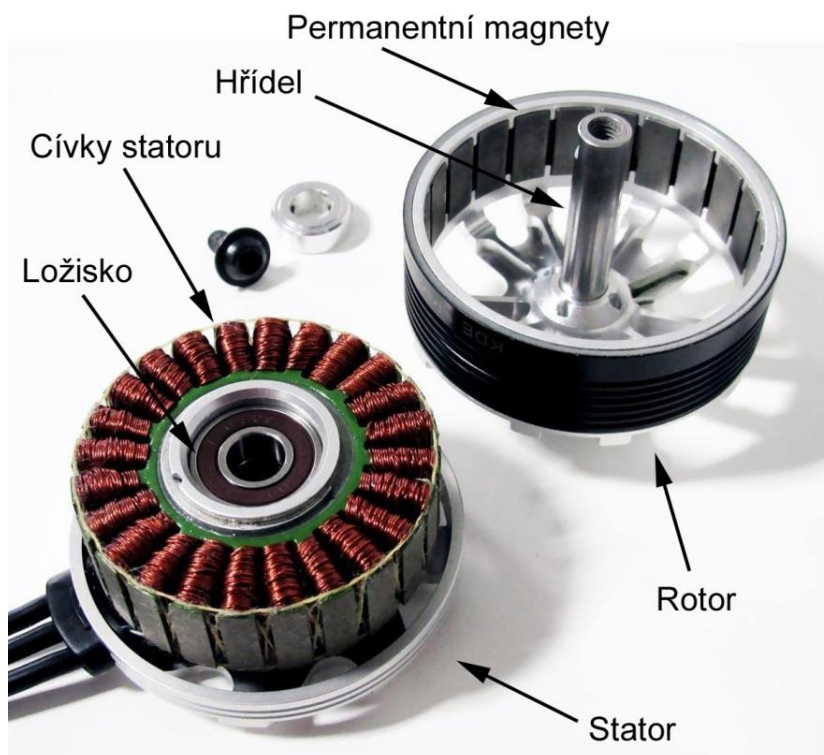


Obrázek 1: T-Motor MT2216 [O1]

#### 2.1.1 Popis

BLDC motory se skládají z několika částí, nicméně pro dosažení rotace hřídele jsou nejdůležitější stator a rotor. Pevná část, za kterou je motor uchycen, se nazývá stator. Na statoru jsou navinuté cívky s jádrem z magneticky měkkého materiálu, které při průchodu proudem vytvářejí elektromagnet. Rotační část, neboli rotor, má v sobě zabudované permanentní magnety a je pevně spojená s hřídelí motoru. Otáčení rotoru je zde dosaženo přiváděním tří fázově posunutých proudů s vlnovým průběhem napětí na cívky. Díky tomu se aktivují příslušné elektromagnety a ty přitahují nebo odpuzují jednotlivé magnety v rotoru, což vede k jeho otáčení. Podle konstrukce rozlišujeme bezkartáčové motory na „Inrunner“, které mají rotor uvnitř a na „Outrunner“, které mají rotor venku. [2]

Na obrázku 2 jsou vyznačeny hlavní části BLDC Outrunner motoru KDE5215XF-330 výrobce KDE Direct.



Obrázek 2: Konstrukce BLDC motoru. [O2] (upraveno)

## 2.1.2 Charakteristika

Oproti kartáčovým elektromotorům, BLDC motory dosahují vyšší účinnosti, bezporuchovosti a dlouhé životnosti. Je to dáno tím, že úlohu komutátoru a kartáčků<sup>1</sup> plní regulátor otáček (viz kapitola 2.3), jenž tvoří s motorem nedílný celek. Životnost takových motorů je omezuje v podstatě jen životnost ložisek, to jsou jejich jediné mechanické součásti. [3]

BLDC motory nabízí vyšší rozsah otáček a lepší charakteristiku točivého momentu vzhledem k rychlosti otáčení. S vyšším počtem cívek a magnetů lze dosáhnout většího momentu za cenu nižších otáček motoru. Toho se s výhodou využívá při konstrukcích velkých multikoptér, neboť můžeme využít větších vrtulí. [2] Hlavním nedostatkem takových motorů je pak jejich cena a nutnost komplikovaného elektronického řízení.

Často jsou BLDC motory popisovány konstantou KV, jež značí počet otáček za minutu při napětí 1 volt v nezátíženém stavu. Vyšší hodnoty KV jsou charakteristické pro motory s vysokými hodnotami RPM<sup>2</sup> a slabším krouticím momentem, kdežto nižší KV naopak ukazují na malou rychlost otáčení a velký krouticí moment. [4]

<sup>1</sup> Mechanické řídicí prvky stejnosměrných elektromotorů, dříve užívaných v modelářství. Jejich hlavními nevýhodami jsou omezená životnost a způsobení rušení během práce.

<sup>2</sup> Otáčky za minutu (z angl. *Revolutions per minute*)



Obrázek 3: Charakteristika BLDC motoru [O3]

Z obrázku 3 plyne, že:

- Se zvýšením počtu otáček lineárně klesá krouticí moment (za předpokladu konstantního vstupního výkonu).
- Maximální výkon motoru je dosažen přibližně v polovině otáček dosažených bez zatížení a v polovině maximálního momentu.

## 2.2 Vrtule

Věda o vrtulích je obsáhlý soubor vědomostí, který by daleko přesahoval rámec této práce, avšak znalost základní problematiky je nezbytná pro pochopení podstaty experimentu.

### 2.2.1 Popis

Vrtule přeměňuje mechanickou energii vyrobenou motorem na tah. Koncepce vrtule přímo ovlivňuje letové výkony letounu. Klasická vrtule pro bezpilotní letadla má 2 listy, avšak někdy se používají taky vícelisté.

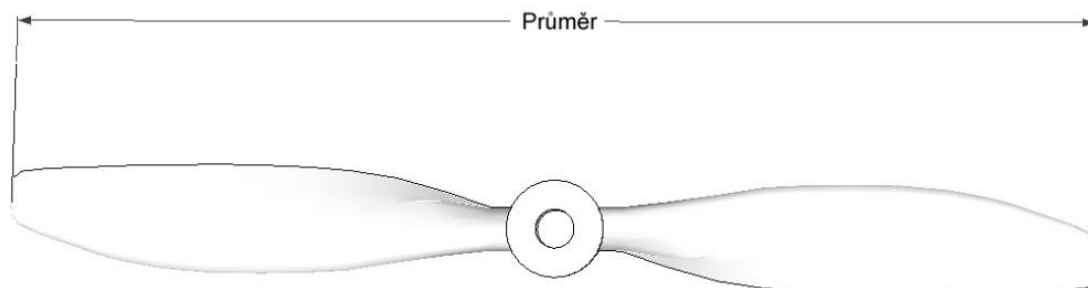
Dle směru rotace vrtule můžeme rozdělit na pravotočivé a levotočivé. V případě vícerotorového pohonného systému je vhodné používat páry protiběžných vrtulí, což umožňuje eliminovat vliv vznikajících točivých momentů dle principu akce a reakce.

Vrtule pro bezpilotní letadla jsou obvykle vyráběny z plastu nebo uhlíkových vláken. Plastové vrtule jsou snadno vyrobitelné a levné, mají ale menší pevnost ve srovnání s uhlíkovými. [5]



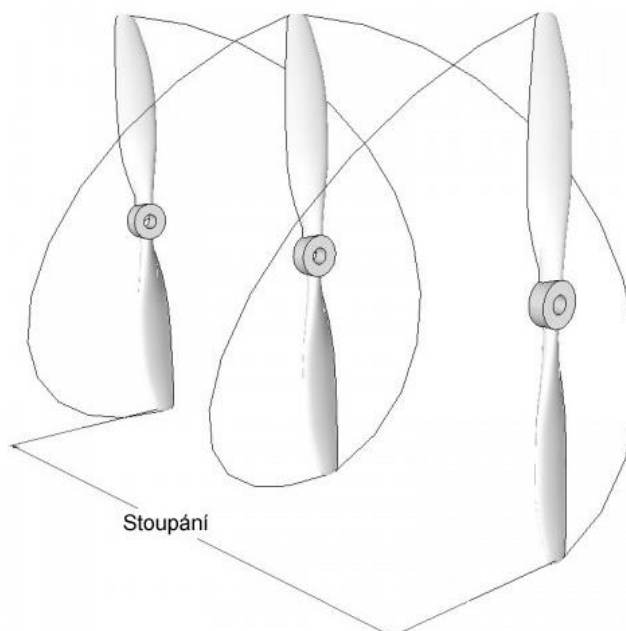
## 2.2.2 Charakteristika

Při pohybu letounu koná každý bod vrtule zároveň rotační a translační pohyb, jeho trajektorií je tedy šroubovice. Její tvar je popsán dvěma parametry vrtule, a to jejím průměrem a stoupáním.



Obrázek 4: Průměr vrtule. [O4] (upraveno)

Průměr vrtule je průměr kružnice, kterou opisují koncové body listů při otáčení.



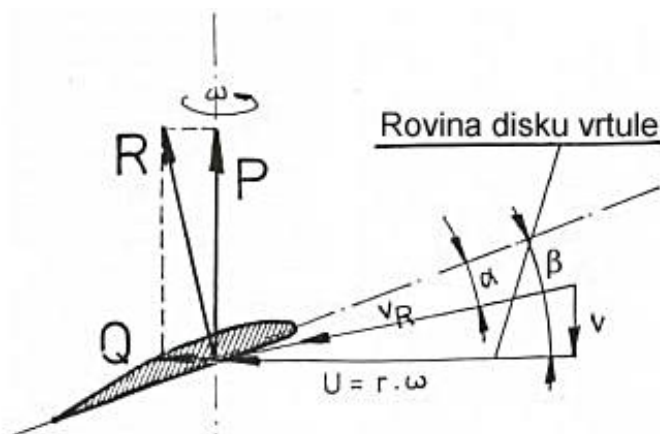
Obrázek 5: Stoupání vrtule. [O5] (upraveno)

Stoupání je vzdálenost na ose rotace, kterou urazí vrtule za jednu svou otáčku. Stoupání má také vliv na rychlost letu letadla – vrtule s větším stoupáním umožní letounu dosáhnout větších rychlostí, než vrtule stejného průměru s menším stoupáním.

Pro označení vrtulí je v této práci použit tradiční zápis pro tento typ vrtulí „průměr“ x „stoupání“, kde hodnoty jsou uvedeny v palcích. Například 14x6 vrtule má průměr 14 palců ( $\approx 355,6$  mm) a stoupání 6 palců ( $\approx 152,4$  mm).

Při rotaci se listy vrtule chovají jako křídla. Na horní straně profilu listu má vzduch vyšší obtokovou rychlost, a tím pádem i nižší tlak, než na dolní straně, díky čemuž se vytváří aerodynamický vztlak a odpor. [6]

Na obrázku 6 jsou znázorněny charakteristické úhly, síly a rychlosti na elementu vrtulového listu.



Obrázek 6: Element vrtulového listu [O6] (upraveno)

- Síly: P – tah vrtule,  
Q – odpor proti otáčení,  
R – výsledná aer. síla na element.
- Úhly: α – úhel náběhu,  
β – úhel nastavení listu vrtule.
- Rychlosti: V – dopředná rychlost letounu,  
U – obvodová rychlost elementu,  
V<sub>R</sub> – výsledná rychlost profilu,  
ω – úhlová rychlost otáčení vrtule.

Protože je vrtule symetrická vůči své ose otáčení, výsledná síla, kterou vytváří, je ve směru této osy.

Úhel β nastavení listu vrtule je dán jejím stoupáním a mění se v závislosti na vzdálenosti od osy otáčení. Výpočetní vztah je dán rovnicí (1):

$$P = 2\pi \cdot r \cdot \operatorname{tg}(\beta) \quad (1)$$

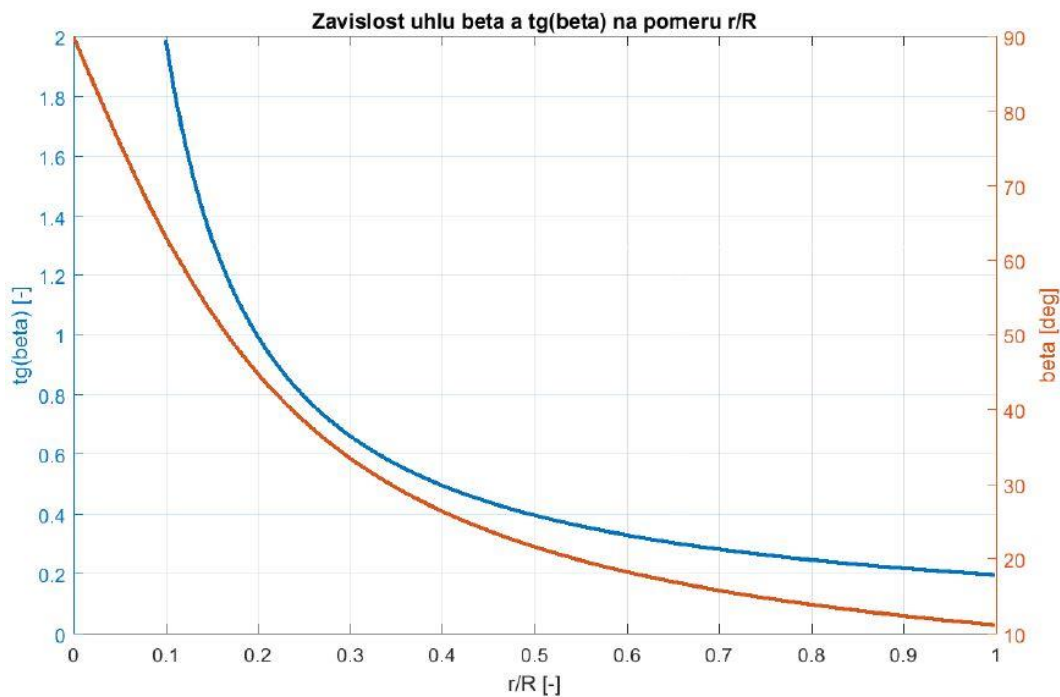
kde P je stoupání [m],  
r je vzdálenost od osy vrtule (v intervalu od 0 do R – poloměru vrtule) [m],  
β je úhel nastavení vrtule [°].

Ze vztahu vyplývá, že závislost  $\operatorname{tg}(\beta)$  na r má charakter hyperboly, tzn. v ose vrtule jde  $\operatorname{tg}(\beta)$  do nekonečna (teoreticky β by měl být roven 90°), se zvětšující se vzdáleností úhel β nelineárně klesá. Na obrázku 7 jsou znázorněny závislosti β a  $\operatorname{tg}(\beta)$  na poměru r/R pro vrtuli 16x10<sup>3</sup>. Na konci listu je v tomto případě úhel nastavení β přibližně 11,25°.

<sup>3</sup> Analytické vztahy pro závislosti β a  $\operatorname{tg}(\beta)$  na poměru r/R jsou ekvivalentní s rovnicí (1). Pro grafické znázornění byly použité následující upravené rovnice.

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{P}{2\pi R \cdot \frac{r}{R}}$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{P}{2\pi R \cdot \frac{r}{R}}\right)$$



Obrázek 7: Závislosti úhlu  $\beta$  a  $\text{tg}(\beta)$  na poměru  $r/R$  (vytvořeno v rámci řešení)

## 2.2.3 Základní vztahy

[5], [7], [8]

Pro popis charakteristik vrtule se používají speciální bezrozměrná čísla: součinitel výkonu  $C_P$ , součinitel tahu  $C_T$  a součinitel kroučícího momentu  $C_Q$ , která jsou dána vztahy (2), (3) a (4)

$$C_P = \frac{P_M}{\rho \cdot n^3 \cdot D^5} \quad (2)$$

$$C_T = \frac{T_V}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (3)$$

$$C_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (4)$$

kde  $P_M$  je výkon na hřídeli motoru – příkon vrtule [W],  
 $T_V$  je tah motoru [N],  
 $Q$  je kroučící moment [Nm],  
 $\rho$  je hustota vzduchu [1,225 kg/m<sup>3</sup>],  
 $n$  jsou otáčky motoru [s<sup>-1</sup>],  
 $D$  je průměr vrtule [m].

Za letu se určitá část výkonu motoru  $P_M$  ztrácí. Spotřebuje se na překonávání odporu listů vrtule, urychlování a zkroucení proudu vzduchu za vrtulí. Větší část výkonu je však spotřebována vrtulí k vyvozování tahu. Tato část se proto nazývá *využitelný výkon*  $P_V$ , který se spočítá pomocí vztahu (5).

$$P_V = T_V \cdot V \quad (5)$$

kde  $P_V$  je využitelný výkon [W],  
 $T_V$  je tah motoru [N],  
 $V$  je rychlost letadla [m/s].

Poměr využitelného výkonu a příkonu vrtule se nazývá *účinnost vrtule*  $\eta$ .

$$\eta = \frac{P_V}{P_M} \quad (6)$$

Dle vztahu (7) se zavede tzv. *rychlostní poměr*  $J$ .

$$J = \frac{V}{nD} \quad (7)$$

S použitím vztahů (2), (3), (5) a (7) se dá účinnost vyjádřit následujícím způsobem

$$\eta = \frac{P_V}{P_M} = \frac{T_V \cdot V}{P_M} = \frac{C_P \rho n^2 D^4 \cdot V}{C_T \rho n^3 D^5} = \frac{C_P}{C_T} \frac{V}{nD} = J \frac{C_P}{C_T} \quad (8)$$

kde  $J$  je rychlostní poměr [–],  
 $C_P$  je součinitel výkonu [–],  
 $C_T$  je součinitel tahu [–].

Z uvedených aerodynamických charakteristik lze vyvodit, že s pevnou vrtulí (s pevnými úhly nastavení) nelze pracovat ve všech režimech letu s maximální účinností. Takováto vrtule bude pracovat optimálně jen při jedné rychlosti letu, v ostatních režimech letu bude její účinnost nižší. Z toho důvodu se na větších letadlech pro dosažení potřebného tahu používají vrtule s proměnným stoupáním, které umožňují plně využít výkonu motoru v různých režimech letu (tzn. aby současně motor a vrtule pracovali s maximální možnou účinností).

Avšak, z důvodu mnohem jednodušší konstrukce a provedení se pro bezpilotní letadla primárně používají vrtule s konstantním stoupáním.

## 2.3 Další související prvky

Elektrickou pohonnou soustavu tvoří motor, vrtule, regulátor otáček a akumulátor. Regulátor otáček slouží k řízení chodu elektromotoru. K němu se rovněž připojuje akumulátor (resp. stacionární zdroj napětí).

Mnoho regulátorů je programovatelných, což je umožňuje přizpůsobit konkrétní aplikaci na míru. Princip ovládání otáček motoru je založen na změně frekvence a tvaru výstupního třífázového napětí sinusového tvaru. [2] Řídící veličinou je tzv. PWM<sup>4</sup> signál. Jedná se o dvouhodnotový periodicky střídavý diskrétní signál, jenž v každé periodě nabývá logických hodnot „0“ a „1“ (v určitém časovém poměru). Řízení se provádí

<sup>4</sup> Pulzně šířková modulace (z angl. *Pulse width modulation*)

prostřednictvím změny tohoto poměru, konkrétně v případě regulátorů změnou šířky signálu s hodnotou „1“. Signál PWM přijímaný regulátorem má šířku přibližně od 1000 do 1800  $\mu s$ , což odpovídá hodnotám tahu od 0 do 100 %.

Pro napájení bezkartáčových motorů se v současné době většinou používají akumulátory na bázi lithia (různé typy jsou označovány jako Li-Po, Li-Ion atd.). Jejich hlavními výhodami jsou malá hmotnost, dobré zatěžovací charakteristiky a efektivní využití akumulované energie. Jednotlivé články (z nichž každý má jmenovité napětí 3,7 V) se dají spojovat sériově a paralelně, což zajišťuje velkou variabilitu akumulátorů různých napětí a kapacit. Konfigurace akumulátoru je udávána zkratkou xS (resp. xSyP), kde písmeno x značí počet sériově zapojených článků, a y paralelně (např. LiPo 4S2P znamená akumulátor se čtyřmi sériově spojenými soustavami, kde v každé z nich jsou 2 paralelně zapojené články). Tím pádem nominální výstupní napětí pro různé konfigurace jsou vždy násobkem 3,7 V.



Obrázek 8: Zapojení BLDC motoru. [O7] (upraveno)

### 3 Měření charakteristik pohonů

V první řadě bude provedena série měření výkonnostních parametrů vybraných pohonných systémů. Experimenty se budou provádět pro různá vstupní napětí a při několika rychlostech nabíhajícího proudu vzduchu pro každou kombinaci vrtule-motor (viz tabulka 1).

Na základě obdržených dat bude vyhodnocena výsledná efektivita pohonných soustav, vyjádřená podílem získaného tahu a příkonu motoru.

Tabulka 1: Parametry měření

Parametr/vybavení	Jednotka	Velikost/název
Napájecí zdroj		Fusion PS2000ADJ
Regulátor		Jeti model Spin 99 Opto
Motor		viz kapitola 3.2
Vrtule		viz kapitola 3.3
Rychlost proudu	[m/s]	00, 10, 15, 17, 20, 25
Napětí	[V]	12.5 (3S) <sup>5</sup> , 14.8 (4S), 18.5 (5S), 22.2 (6S)

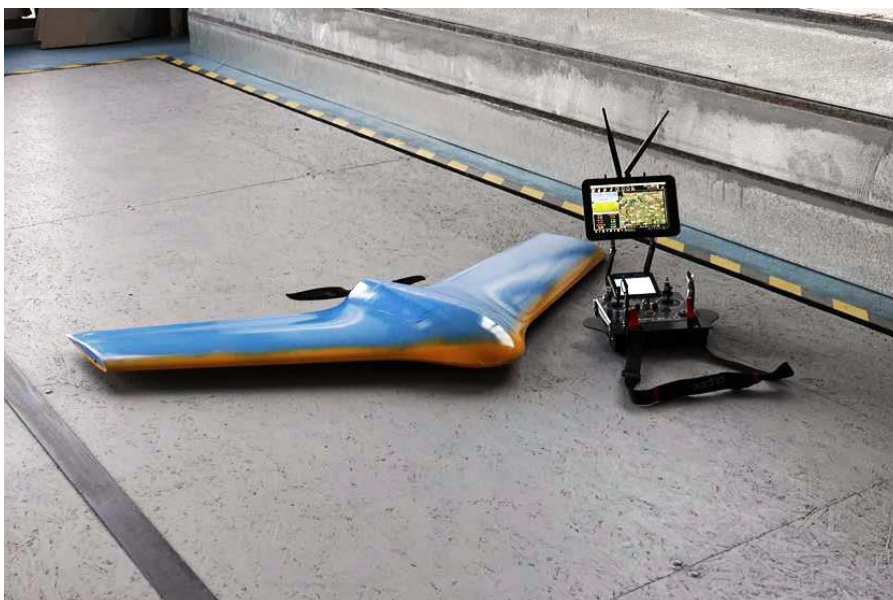
Měřená pohonná soustava je určena primárně pro bezpilotní systém VUT 714, vyvíjený na Leteckém ústavu VUT v Brně (technická data viz tabulka 2). Z toho důvodu základní rychlostí pro hodnocení efektivitu pohonu letounu je jeho cestovní rychlost 17 m/s. Pro horizontální let při této rychlosti je požadován tah 200 g.

Tabulka 2: VUT 714 - Technická data

Parametr	Jednotka	Velikost
Rozpětí	[m]	1,6
Délka	[m]	0,8
Vzletová hmotnost	[kg]	2,5
Platící zatížení	[kg]	0,9
Cestovní rychlost	[m/s]	17
Vytrvalost	[h]	0,9
Výkon	[W]	400

---

<sup>5</sup> Náhrada za 11.1 V (3S)



Obrázek 9: UAS VUT 714

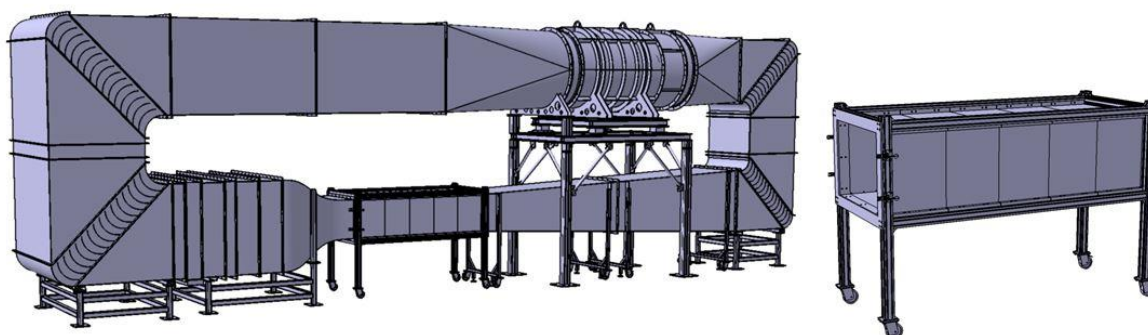
### 3.1 Využívané zařízení a software

#### 3.1.1 Aerodynamický tunel

Všechna měření se provádí v aerodynamickém tunelu instalovaném v dílenských prostorech Leteckého ústavu VUT v Brně. Stručný přehled jeho charakteristik je uveden v následující tabulce.

Tabulka 3: Vybrané specifikace aerodynamického tunelu na LÚ VUT

<b>Typ tunelu</b>	Uzavřený
<b>Maximální rychlost proudu</b>	60 m/s
<b>Maximální intenzita turbulence<sup>6</sup></b>	0,25 %
<b>Rozměry měřicí sekce</b>	500 x 700 x 2000 mm



Obrázek 10: Aerodynamický tunel na LÚ VUT

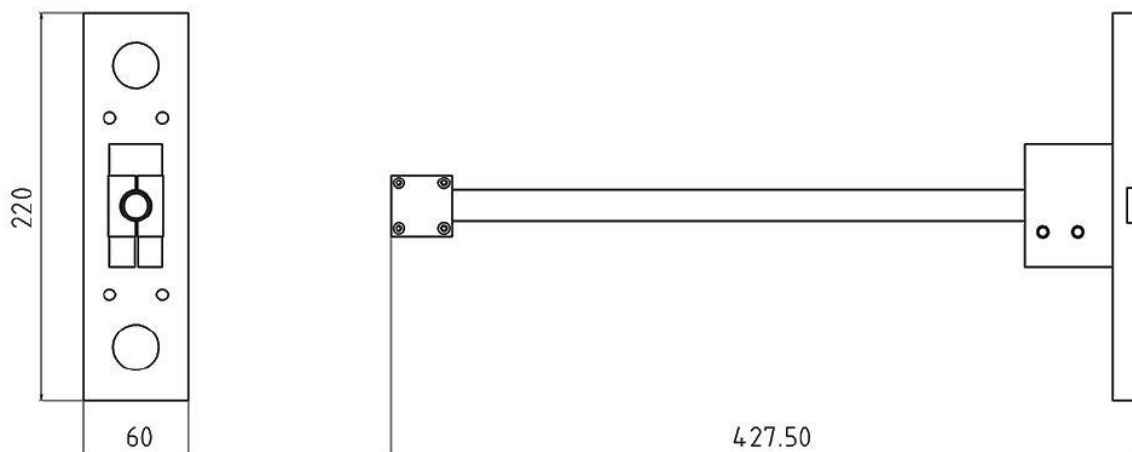
Součástí tunelu je taky ovládací pult a automatický traverzovací systém.

<sup>6</sup>Je definována jako poměr směrodatné odchylky místní rychlosti vzduchu k místní střední rychlosti vzduchu, pro hodnoty menší než 1 % se turbulence považuje za nízkou. [13]

### 3.1.2 Měřicí stojan VUT STAND

V rámci bakalářské práce, napsané na Leteckém ústavu v roce 2017 panem Petrem Zemanem, byl s ohledem na případné umístění do aerodynamického tunelu vyvinut a vyroben měřicí stojan VUT STAND.

Skládá se z podstavy, ramene a úchyty motoru. Podstava slouží k pevnému uchycení celého stojanu na požadované místo. Úchyt motoru a podstavu spojuje rameno kruhového průřezu, na které jsou rovněž nalepeny tenzometry k měření tahu motoru. Kabeláž od motoru je vedena dutinou uvnitř trubky. [2]



Obrázek 11: Rozměry držáku VUT Stand [O3]

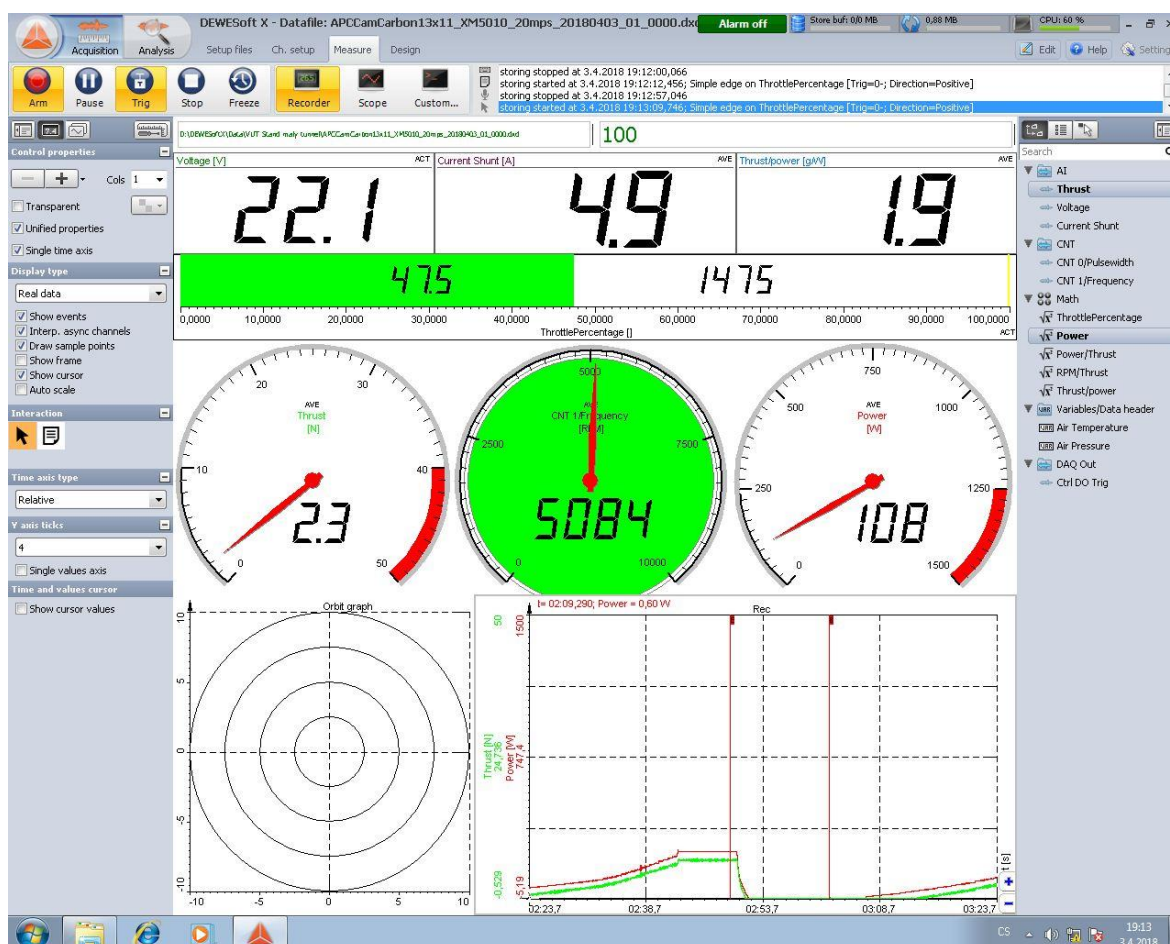
### 3.1.3 Dewetron Minitaur 101, DeweSoft X2

Všechny měřené veličiny jsou zaznamenávány kontinuálně v dataloggeru Dewetron Minitaur 101 s měřicí kartou Dewe 43. [2] Výstup výsledků je prováděn prostřednictvím programu DeweSoft X2. Kromě výstupu měřených veličin v reálném čase disponuje program také širokými možnostmi přednastavení parametrů měření a exportu dat do různých formátů, zejména do formátu m-souborů.

Ovládání je řešeno přes vysílač Jeti model DS-16 pomocí sekvencéru, jenž při zapnutí lineárně mění ovládací signál PWM od přibližně 1000 do 1800  $\mu s$  (což odpovídá 0 až 100 % tahu) v určitém časovém úseku.

Na uvedeném obrázku je představeno prostředí programu DeweSoft X2. Graf napravo uvádí velikosti měřených veličin v reálném čase, začátky a konce měření jsou označeny svislými čarami.





Obrázek 12: Prostředí programu DeweSoft X2

Pro eliminaci rizika poškození motoru jsou v programu nastaveny tzv. trigger – bezpečnostní spínače, které ukončí experiment při dosažení maximálního přípustného proudu nebo příkonu (viz tabulka 4).

Tím pádem měření začne vždy na 0 % tahu spuštěním sekvencí a ukončí se po dosažení 100 % tahu, resp. dříve v případě překročení limitních hodnot.

## 3.2 Měření motory

Pro měření byly zvoleny 2 BLDC motory firmy Dualsky<sup>7</sup>: XM4608MR-8.5 a XM5010MR-9. Tyto motory jsou určeny primárně pro quadro- a hexacoptery, nacházejí se v přibližně stejné cenové kategorii (≈1700 Kč) a mají podobné specifikace.

V následující tabulce jsou uvedeny hlavní parametry motorů, celý seznam viz příloha B.

<sup>7</sup> Celý název: Shanghai Dualsky Models Co., Ltd.

Tabulka 4: Specifikace motorů (výběr)

Parametr	Jednotka	Velikost/název	
<b>Motor</b>		<b>XM5010MR-9</b>	<b>XM4608MR-8.5</b>
Použité označení		XM5010	XM4608
RPM/V (KV)	$[\text{min}^{-1}\text{V}^{-1}]$	690	390
Hmotnost bez kabelů	$[g]$	100	114
Drážky, póly	$[-]$	24, 22	24, 28
Max. proud (15s)	$[A]$	29	25
Max. výkon (15s)	$[W]$	423	555



Obrázek 13: Měřené motory (nalevo XM5010MR-9, napravo XM4608MR-8.5)

### 3.3 Měřené vrtule

Mezi vybrané patří 9 vrtulí Aeronaut APC CamCarbon o průměrech 11 až 16 palců. Jedná se o sklápěcí<sup>8</sup> vrtule určené pro elektrické motory. Jsou vyrobeny výhradně ze směsi uhlíkových vláken zpracovávaných nylonem. [9]

<sup>8</sup> Speciální typ vrtulí, u kterých dochází ke sklápění listů při zastavení motoru za letu. Tím dochází k poklesu aerodynamického odporu, snižuje se riziko utržení vrtule atd. Používá se např. u motorizovaných větroňů.

Tabulka 5: Seznam měřených vrtulí

Vrtule Aero-naut CamCarbon									
Rozměr	11x6	13x6,5	13x11	14x6	14x8	14x12	16x8	16x10	16x13
Hmotnost [g]	11	16	16	17	18	18	21	20	26
Použité označení: APCCamCarbon****	1106	1365	1311	1406	1408	1412	1608	1610	1613



Obrázek 14: Listy vrtule Aero-naut CamCarbon. [O8] (upraveno)

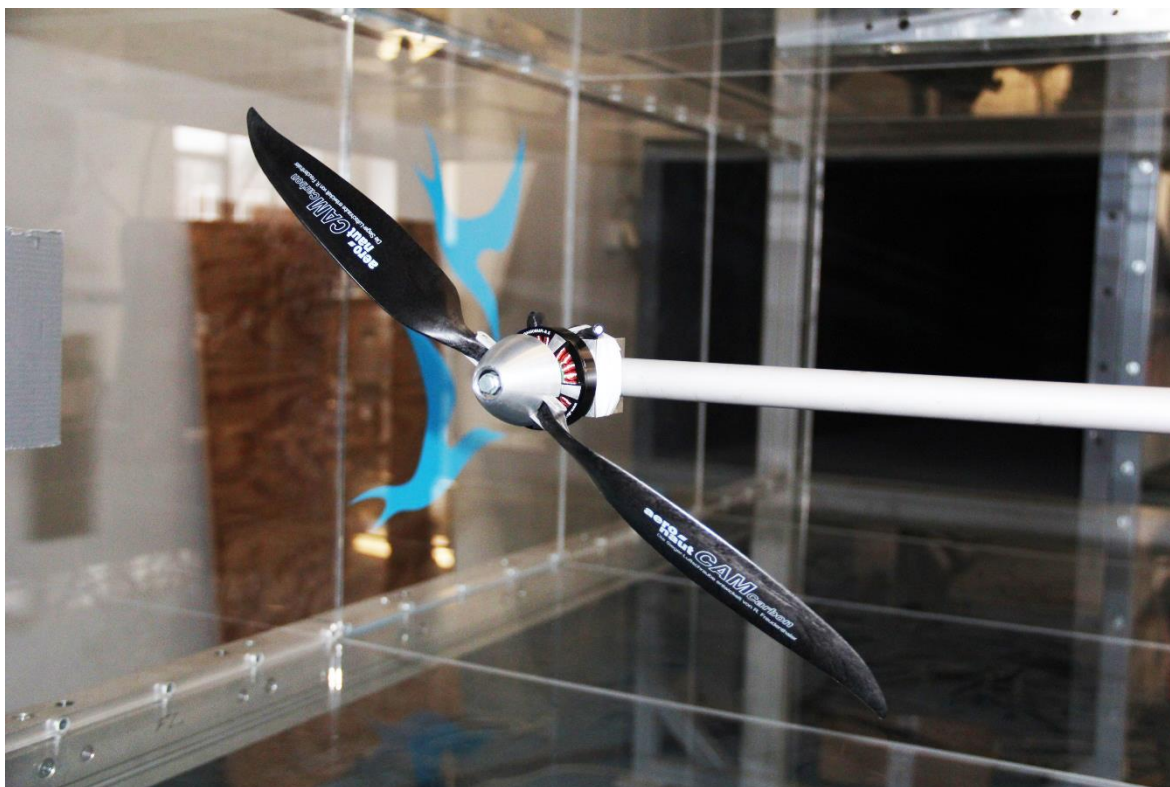


Obrázek 15: Měřené vrtule  
(pořadí na obrázku odpovídá pořadí v tabulce 5, tj. zleva doprava 11x6, 13x6,5 atd.)

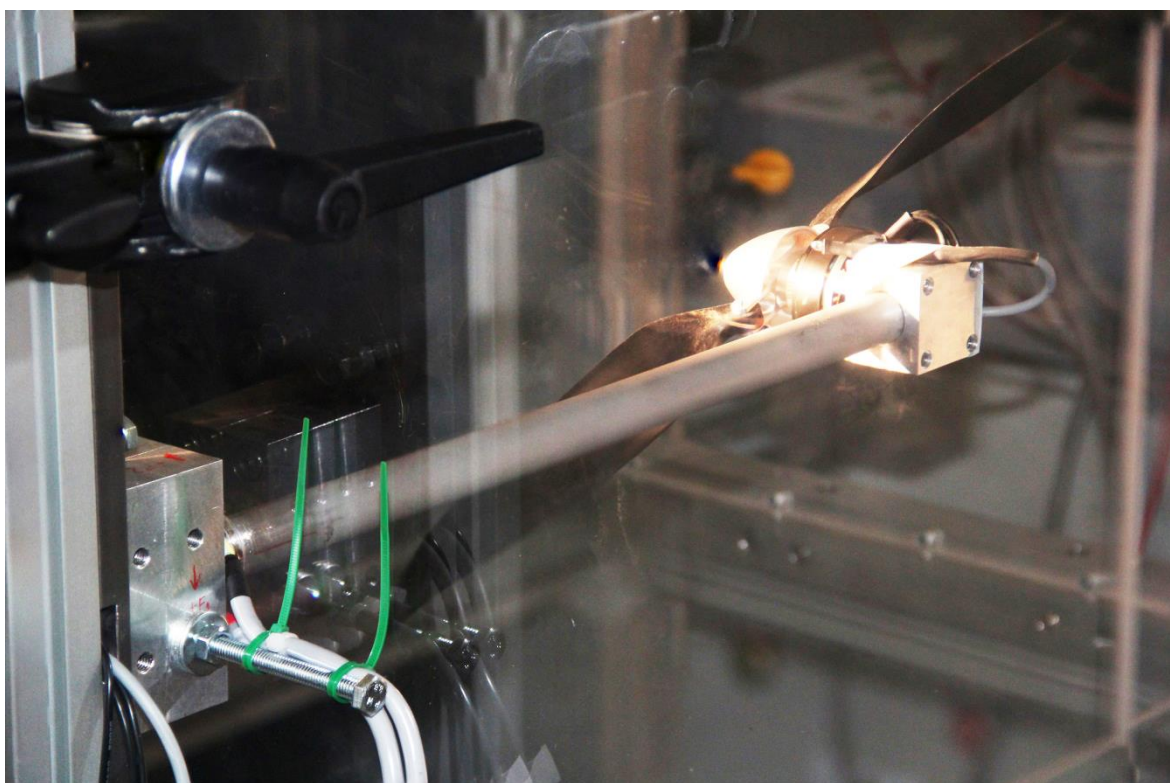
### 3.4 Postup

Měřené motory a vrtule jsou postupně upevňovány na držáku a instalovány do měřicí sekce aerodynamického tunelu (obrázky 16, 17). Celkem je 18 kombinací vrtule-motor. Pro každou kombinaci se postupně nastaví rychlost proudění vzduchu v tunelu (celkem 6 rychlostí), při každé z nich je prováděno měření pro všechna čtyři napětí. Tím pádem je celkem  $18 \cdot 6 \cdot 4 = 432$  měřených konfigurací.





Obrázek 16: Motor XM4608 + vrtule 16x13



Obrázek 17: Stojan VUT STAND s motorem

V následující tabulce jsou uvedené měřené veličiny. Výstupem každého měření jsou všechny veličiny v závislosti na času.

Tabulka 6: Měřené veličiny

Přímo měřené veličiny			
Název, značení	Jednotka	Popis/význam	
Napětí, $U$	[V]	Aktuální napětí na motoru.	
Proud, $I$	[A]	Proud odebíraný motorem.	
PWM	[ $\mu s$ ]	Diskrétní modulace ovládacího signálu. Explicitně se přepočte na procenta celkového tahu (0-100 %).	
Tah, $F_{tah}$	[N]	Síla ve směru osy rotace, kterou vyvine daný motor s danou vrtulí.	
Otáčky (RPM)	[ $min^{-1}$ ]	Počet otáček za minutu.	
Nepřímo měřené veličiny			
Název, značení	Jednotka	Výpočtový vztah	Popis/Význam
Příkon, $P$	[W]	$P = U \cdot I$	Množství energie spotřebované za jednotku času.
Tah, $m_{tah}$	[g]	$m_{tah} = \frac{F_{tah}}{g} \cdot 1000$	Hodnota tahu, přepočtena na gramy.
Efektivita, $\mu$	[g/W]	$\mu = \frac{m_{tah}}{P}$	Efektivita je zde daná jako podíl tahu k příkonu motoru. Udává hmotnost, kterou je schopen unést daný motor s vrtulí při příkonu jeden watt.

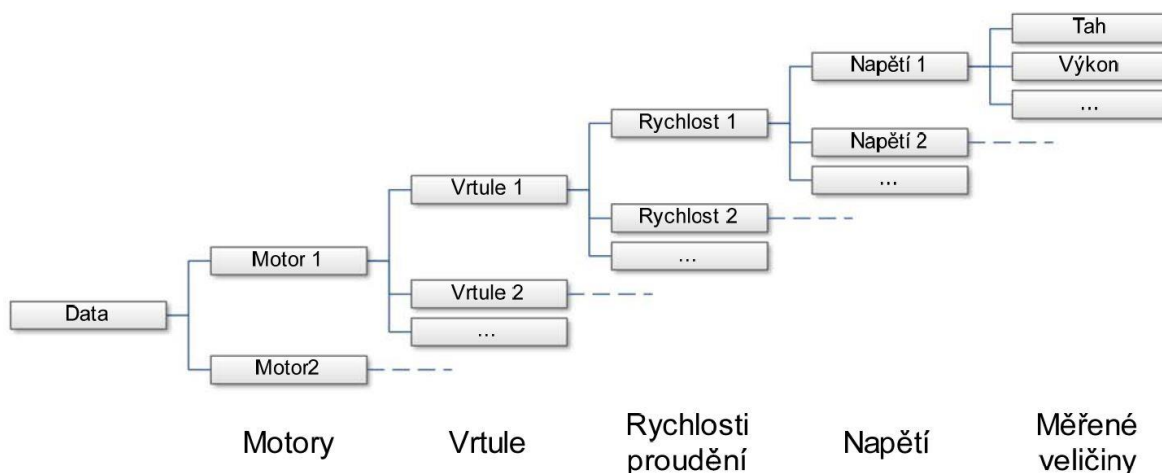
Po měření se obdržená data ukládají do souborů formátu „\*.dxd“, což umožňuje znázornit průběh měření kdykoliv po ukončení experimentu. Avšak pro následující zpracování v prostředí MATLAB je zapotřebí konverze do formátu „\*.m“.

### 3.5 Zpracování dat v prostředí MATLAB

Pro zpracování byly vytvořeny 2 skripty: „DataProcess.m“ a „DataVisualize.m“. V této kapitole budou popsány hlavní principy jejich fungování a následně bude provedeno vyhodnocení výsledku. Detailnější popis a zdrojové kódy lze nalézt na přiloženém CD se skripty.

### 3.5.1 Návrh skriptů

První skript slouží pro vytvoření hierarchické struktury<sup>9</sup>, třídění a uložení dat z experimentů do ní. Na obrázku 18 je zobrazen stromový diagram struktury. Výstupem z programu je soubor „*data.mat*“ obsahující danou strukturu, který pak slouží jako zdroj dat pro druhý skript.



Obrázek 18: Stromový diagram struktury

Přístup k výsledkům experimentu při konkrétní konfiguraci se uskutečňuje pomocí „tečkového zápisu“ dle následujícího vzorce:

*Data.(Motor).(Vrtule).(Rychlost).(Napětí).(Měřená veličina)*, kde se v jednotlivých závorkách zapisují parametry konfigurace a konkrétní měřená veličina. Označení motorů a vrtulí jsou uvedené v tabulkách 4 a 5. Pro zadání rychlosti v tunelu jsou použité klíče *mps\*\**, kde \*\* je určitá rychlost (00, 10, 15, 17, 20 nebo 25). Napětí se značí zkratkou *S\**, kde \* je počet článku (3, 4, 5 nebo 6). Klíče měřených veličin jsou dané řídicím programem, nejdůležitější z nich jsou *Thrust* (tah) a *Power* (výkon).

Například zápis „*Data.XM4608.APCCamCarbon1408.mps00.S4.Thrust*“ se použije pro přístup k hodnotám tahu u motoru XM4608MR-8.5 s vrtulí 14x8 při rychlosti proudu v tunelu 0 m/s a napájecím napětí 14,8 V (4S).

Pro lepší algoritmizaci jsou pak jednotlivá označení seskupena do jedné proměnné typu pole. Například, pole „Motor“ obsahuje 2 výrazy: „XM4608“ a „XM5010“ (analogicky jsou tvořena pole „Propeller“, „Velocity“ a „Voltage“). Uvedená konvence umožňuje zadávání konkrétní konfigurace pomocí indexů. Tak například data z již zmíněného příkladu lze taky získat zápisem „*Data.(Motor{1}).(Propeller{5}).(Velocity{1}).(Voltage{2}).Thrust*“.

Druhý skript „DataVisualize.m“ je určen pro algoritmizaci grafického výstupu dat obdržených z předchozího skriptu. Mezi jeho funkce patří nalezení vhodných aproximačních podmínek pro každý soubor dat zvlášť a proložení aproximačního splajnu.

<sup>9</sup> Struktura (strukturní pole, z angl. *structure array*) – jedná se o datový typ „*struct*“, jenž seskupuje související data pomocí datových kontejnerů (tzv. polí). Každé pole může obsahovat libovolný typ dat (včetně dalších struktur), což umožňuje vytvářet substrukтуры, resp. víceúrovňové struktury.

### 3.5.2 Vyhodnocení výsledků

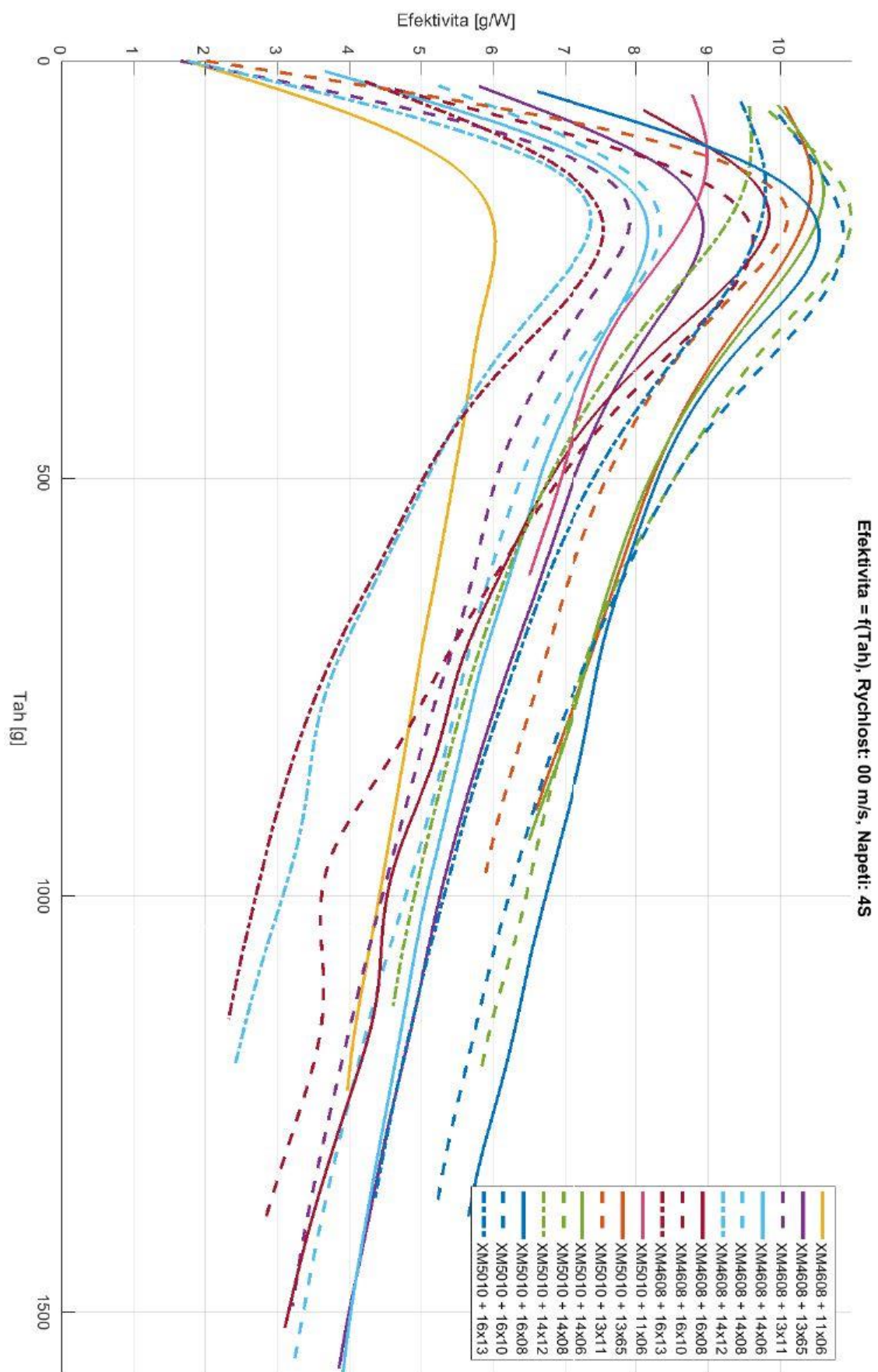
V první řadě byly sestrojeny grafy závislosti efektivity na tahu pro rychlosti 0, 10 a 17 m/s za konstantního napětí 14,8 V (4S). Kombinace motoru s vrtulemi stejného průměru jsou ve grafech znázorněny stejnými barvami, různým stoupáním odpovídají různé typy čar (obrázky 19, 20 a 21).

Je patrné, že ve všech případech efektivita dosahuje nejvyšších hodnot u kombinace motoru XM5010 s vrtulemi 14x8, 14x12, 16x8, 16x10 a 16x13, přičemž vrtule 13x11 vykazuje rovněž vysokou efektivitu, avšak nepřipadá v úvahu z důvodu menší rezervy tahu při vyšších rychlostech.

Pro jiná napětí (při 3S, 5S a 6S) jsou výsledky pozorování podobné (již zmíněné vrtule zachovávají vysokou hodnotu efektivity).

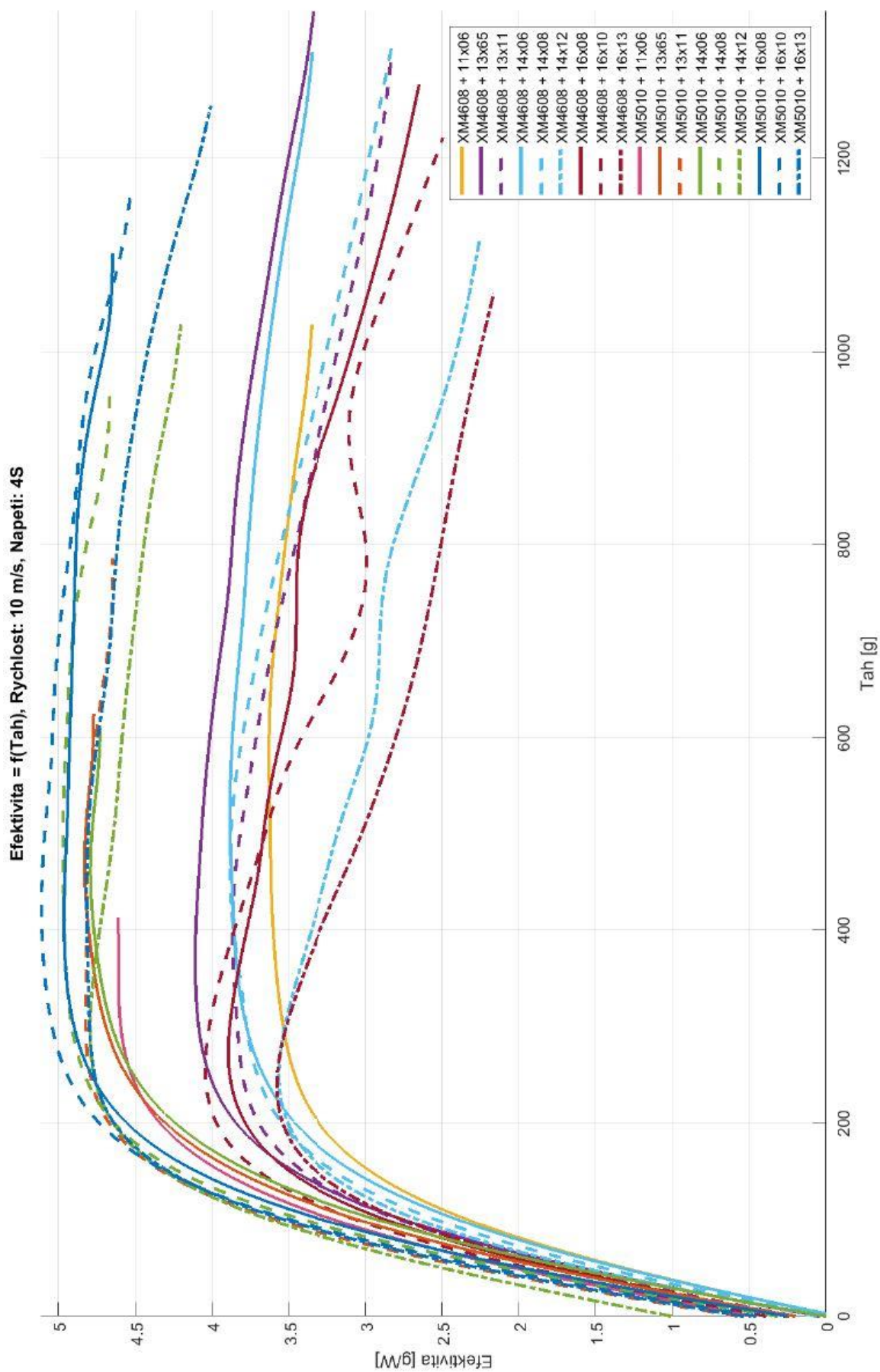
V kombinaci s motorem XM4608 jsou vhodné vrtule o velikostech 13x6,5, 13x11, 16x8 a 16x10. Avšak jejich maximální efektivita je zhruba o 20 % nižší než při použití motoru XM5010. Jelikož rozdíl ve hmotnosti obou motorů je relativně malý (vzhledem k celkové hmotnosti letounu), soustavy s motorem XM4608 nebudou nadále brány v úvahu.



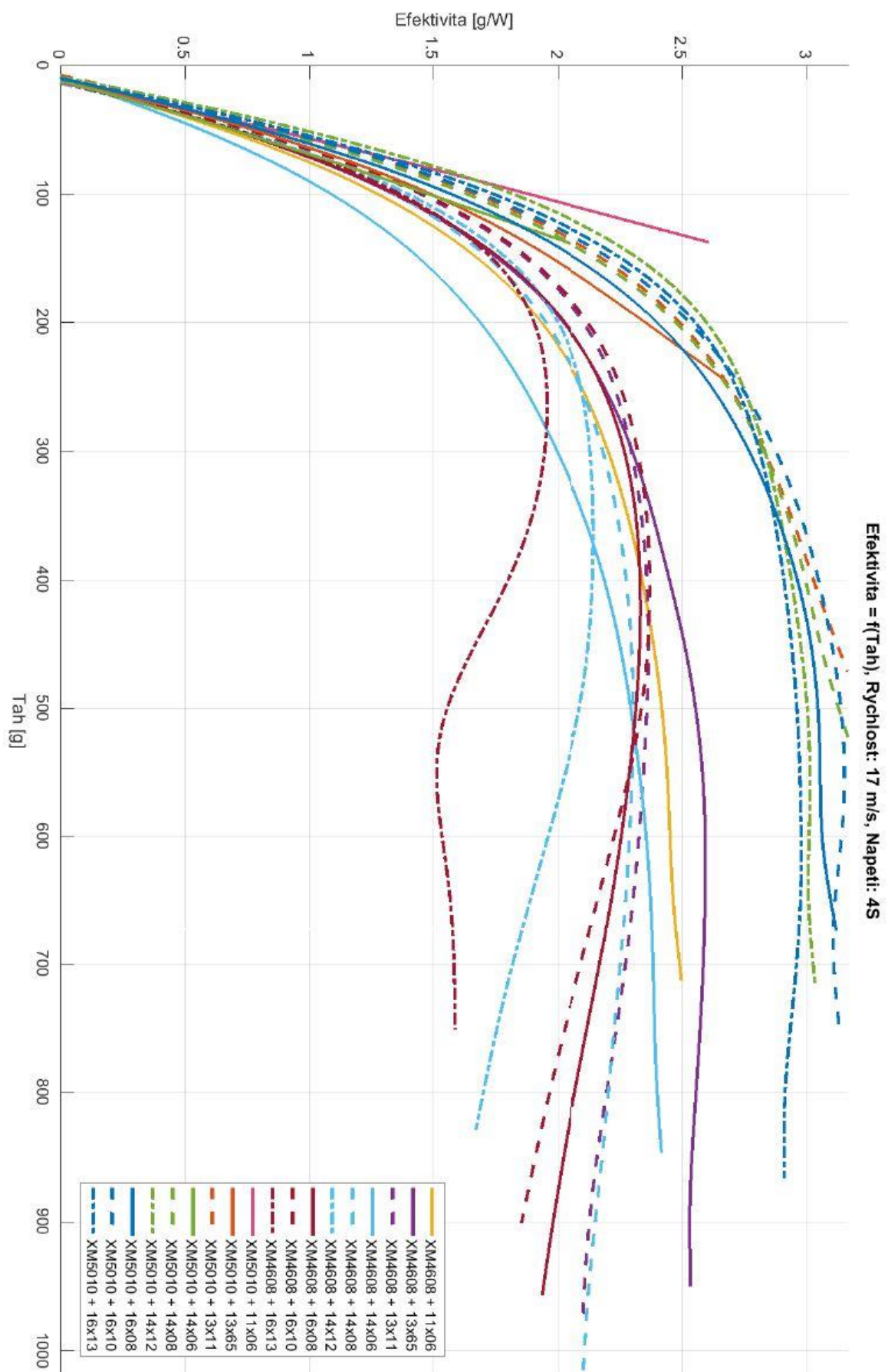


Obrázek 19: Graf, Efektivita = f(Tah), Rychlost: 00 m/s, Napětí: 14,8 V (4S)



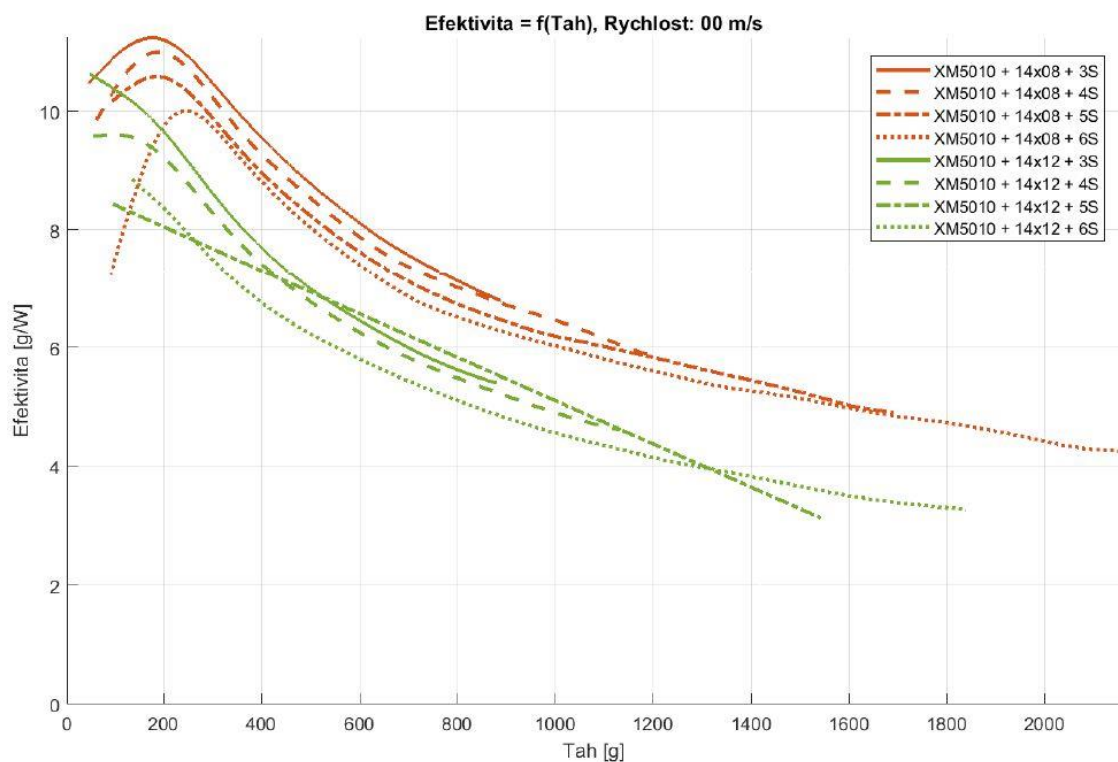


Obrázek 20: Graf, Efektivita = f(Tah), Rychlost: 10 m/s, Napětí: 14,8 V (4S)

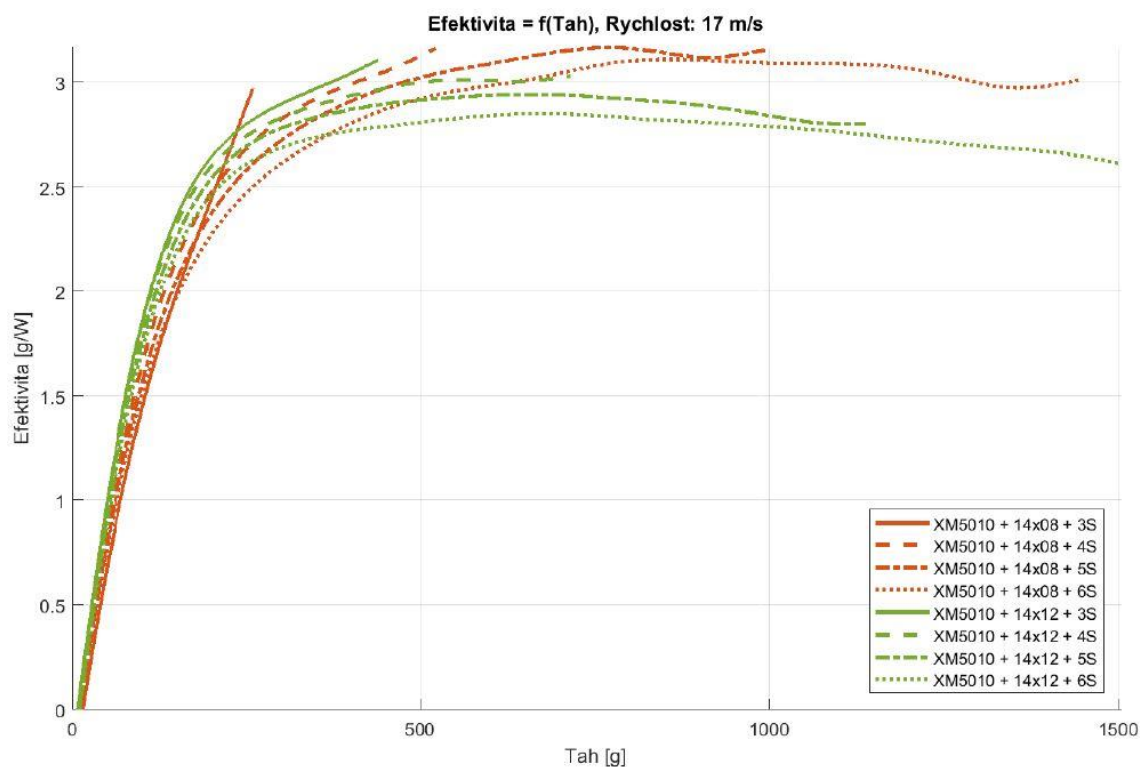


Obrázek 21: Graf, Efektivita = f(Tah), Rychlost: 17 m/s, Napětí: 14,8 V (4S)

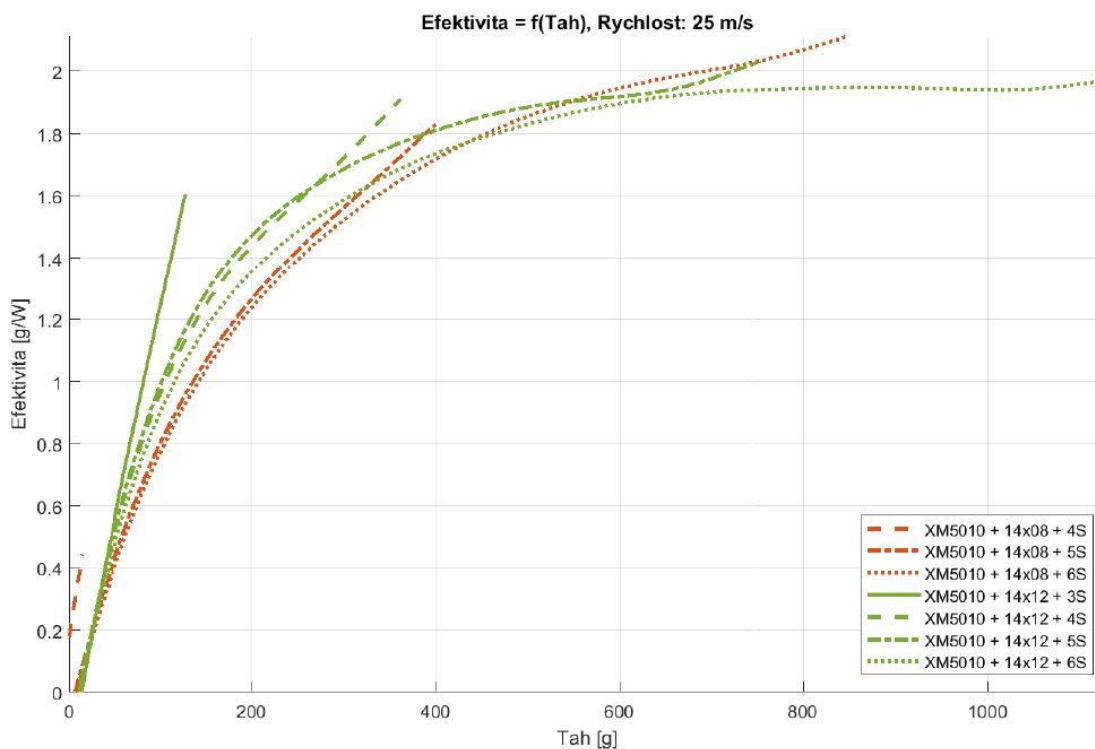
Následně jsou provedeny porovnání efektivity pro různá stoupání a různá vstupní napětí u vrtulí stejného průměru. Grafy pro vrtule 14x8 a 14x12 při rychlostech 0, 17 a 20 m/s jsou na obrázcích 22, 23, 24. Různé vrtule se odlišují podle barvy čáry, různá napětí – dle typu čáry.



Obrázek 22: Graf, Efektivita =  $f(Tah)$ , Rychlost: 00 m/s (vybrané kombinace)



Obrázek 23: Graf, Efektivita =  $f(Tah)$ , Rychlost: 17 m/s (vybrané kombinace)



Obrázek 24: Graf, Efektivita =  $f(\text{Tah})$ , Rychlost: 25 m/s (vybrané kombinace)

Při nulové rychlosti nabíhajícího proudu vrtule s menším stoupáním má větší efektivitu, avšak při zvětšení rychlosti se situace mění na opačnou. Je vidět, že při cestovní rychlosti (17 m/s) a vyšších je již vrtule 14x12 vhodnější volbou (což je v souladu s teorií).

Z hlediska napětí, jsou vidět určité závislosti u obou stoupání. Čím vyšší napětí – tím větší maximální tah je motor schopen vyvinout. Z grafu na obrázku 23 je patrné, že při 17 m/s je pro vrtuli 14x8 (resp. 14x12) maximální tah 250 g (resp. 460 g) pro 3S, 520 g (resp. 700 g) pro 4S, 1000 g (resp. 1170 g) pro 5S a 1450 g (resp. 1500 g) pro 6S.

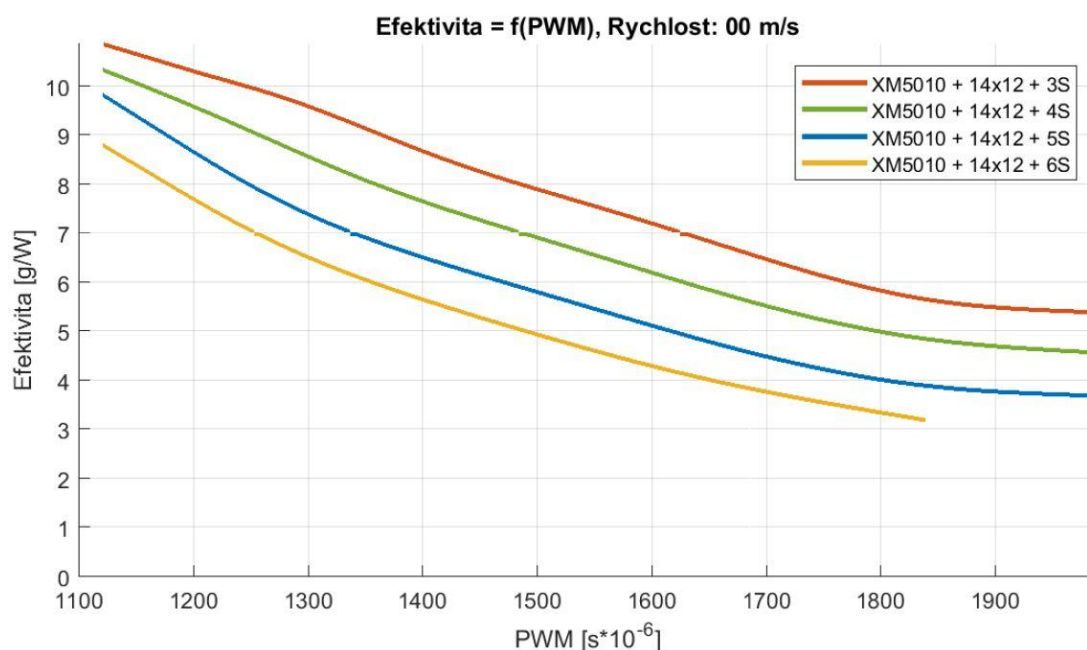
Je zřejmé, že pro dané kombinace vrtule-motor nemohou být použity akumulátory o napětí 12,5 V (3S) z důvodu nedostatečného tahu (i když při nízkých rychlostech je u nich efektivita nejvyšší).

V příloze C lze nalézt další grafy závislosti efektivit na tahu:

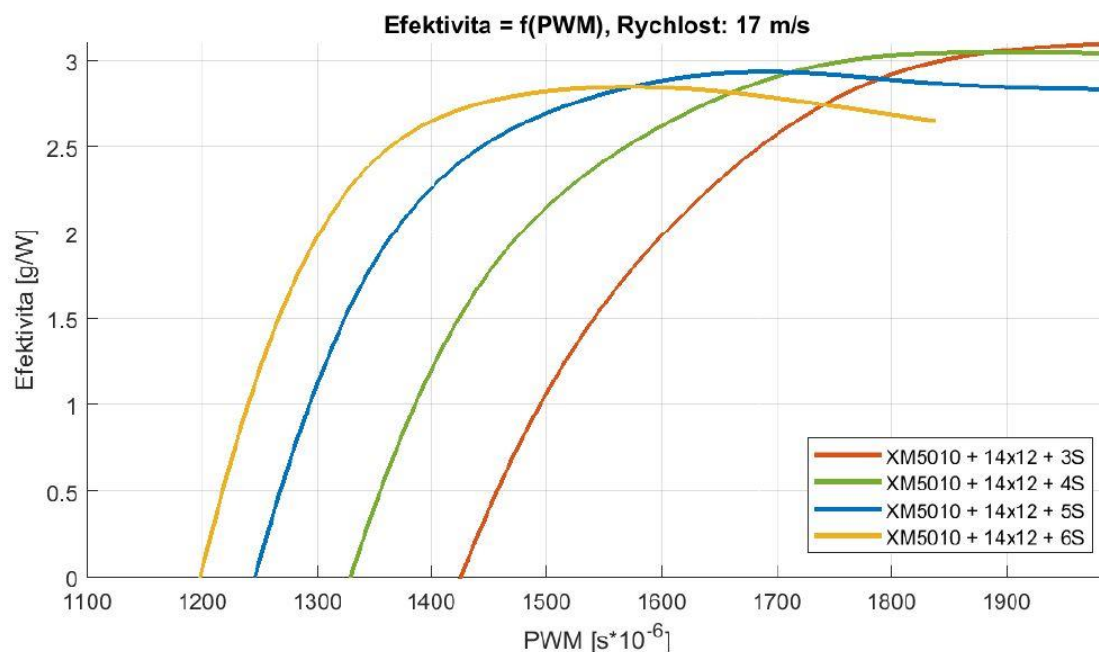
- Motor XM5010, vybrané vrtule o průměrech 14 a 16 palců, 0 m/s, všechna napětí
- Motor XM5010, vrtule o průměru 16 palců, 17 m/s, napětí 4S až 6S
- Motor XM5010, vrtule o průměru 16 palců, 25 m/s, napětí 4S až 6S

Jako nejvhodnější vrtule o průměru 16" se projevila 16x10. V poslední části budou porovnány kombinace motoru XM5010 s vrtulemi 14x12 a 16x10.

V případě vynesení závislosti efektivit na řídicím signálu PWM dostaneme charakteristiku jako na obrázku 25 (pro nulovou rychlost) nebo na obrázku 26 (pro 17 m/s).



Obrázek 25: Graf, Efektivita = f(PWM), Rychlost: 00 m/s, Motor: XM5010, Vrtule: 14x12

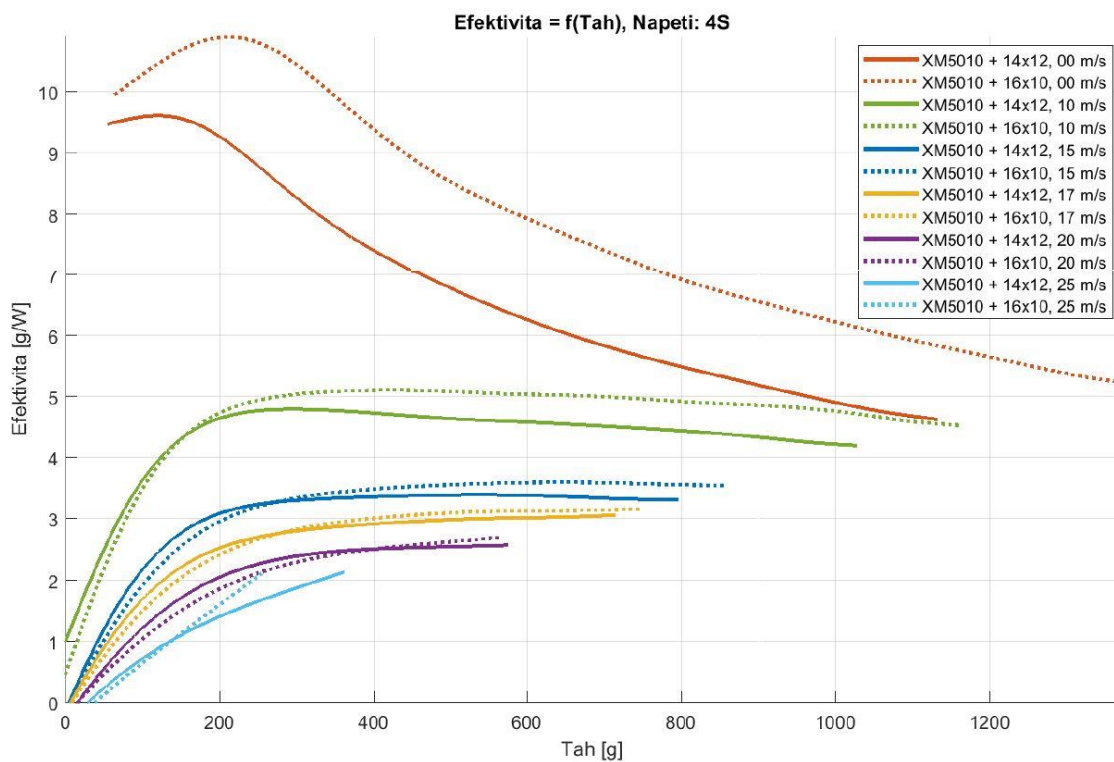


Obrázek 26: Graf, Efektivita = f(PWM), Rychlost: 00 m/s, Motor: XM5010, Vrtule: 14x12

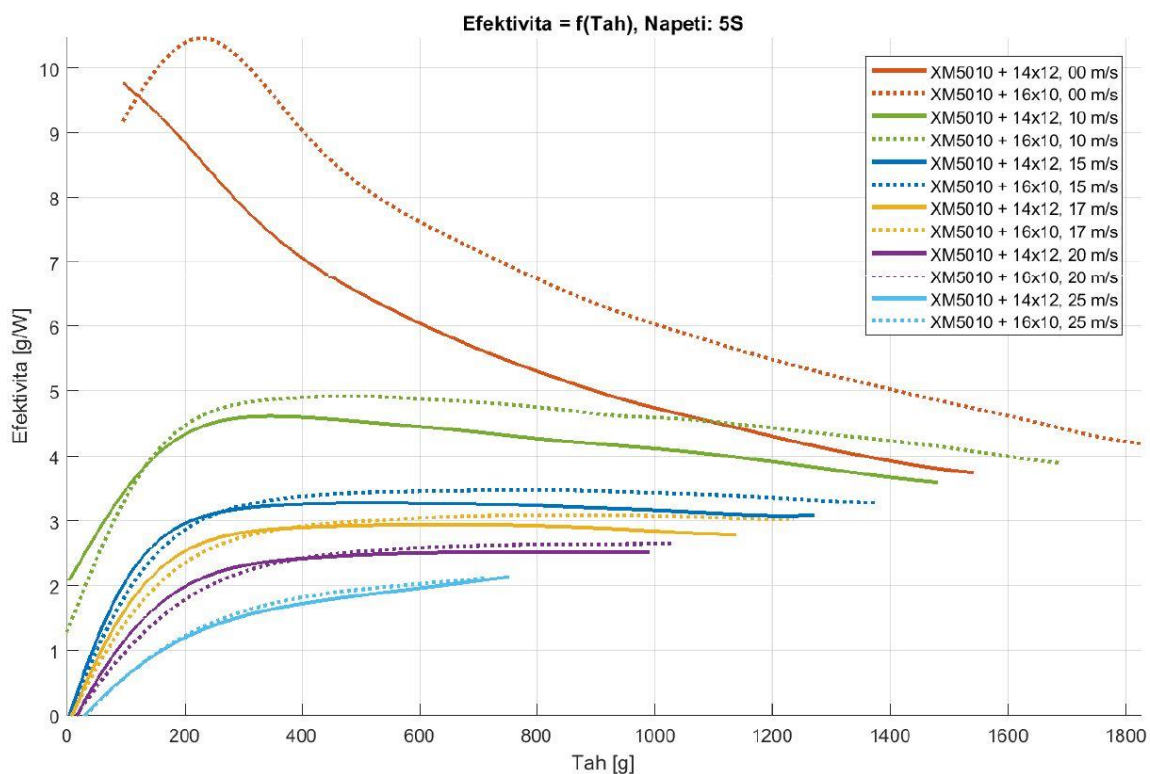
Z předchozích úvah plyne, že zvyšujícím se napětím klesá (maximální) efektivita, ale zvyšuje se maximální hodnota tahu.

V následujících grafech závislosti efektivity na tahu jsou porovnány dvě vybrané kombinace motor-vrtule pro hodnoty napětí 14,8 V (4S) a 18,5 V (5S). Křivky pro různé rychlosti odpovídají různým barvám, pro vrtuli 14x12 jsou křivky plné, pro 16x10 – tečkované.





Obrázek 27: Graf, Efektivita = f(Tah), Napětí: 14,8 V (4S), Vrtule 14x12 a 16x10



Obrázek 28: Graf, Efektivita = f(Tah), Napětí: 18,5 V (5S), Vrtule 14x12 a 16x10

## 4 Doporučení nejvhodnějšího pohonného systému

Na základě provedených experimentů byl zvolen nejvhodnější pohonný systém, který se skládá z motoru **Dualsky XM5010MR-9** a vrtule **Aero-naut CamCarbon 14x12**. Je doporučeno napájecí napětí 14.8 V (4S).

Tato kombinace poskytuje nejvyšší efektivitu při režimu cestovního letu (tah 200 g, cestovní rychlost 17 m/s). Zároveň také plní požadavky na vysoký tah při nižších rychlostech letu a zaručuje proto bezproblémový start a stoupání bezpilotního letounu do pracovní výšky. Rezerva tahu při cestovní rychlosti zaručuje možnost zvýšení rychlosti letu, resp. dynamických vlastností letadla v případě potřeby.

Vysokou hodnotu efektivit daný motor vykazuje rovněž i v kombinaci s vrtulí Aero-naut CamCarbon 16x10. Daná vrtule by byla vhodnější v případě nižší cestovní rychlosti resp. v případě většího požadovaného tahu.

## 5 Rychlostní pole za vrtulí

V návaznosti na úspěšné měření tahu pohonných systémů a nalezení vhodné konfigurace pro osazení do bezpilotního prostředku VUT 714 bude provedeno detailní měření proudového pole za pracující vrtulí. Tento experiment umožňuje porozumět rozložení rychlostí za vrtulí a pomůže tím dalšímu vývoji bezpilotních prostředků řady VUT 700 zejména s ohledem na minimalizaci interferencí mezi pohonnou jednotkou a drakem platformy. Tato část je nad rámec zadání BP.

### 5.1 Podstata experimentu

Cílem je změřit rychlostní pole za pracující vrtulí s následným zpracováním výsledků a vizualizací proudění.

Experiment se skládá ze dvou částí:

- Kalibrační měření rychlostní sondy, návrh skriptu.
- Měření tlaků pomocí traverzovacího systému, modernizace skriptu, vizualizace.

Účelem kalibrace sondy je stanovit závislost mezi úhly natočení trubice, rychlosti proudění a okamžitým tlakovým rozložením. Zde vycházíme ze znalosti úhlů natočení a měříme příslušné tlaky. Následně musíme vstup i výstup obrátit. Jinými slovy, jde o vytvoření výpočetního modelu, na jehož vstupu bude potřebný počet tlaků, a na výstupu úhly natočení trubice v obou osách a rychlost proudění vzduchu.

Jelikož vycházíme z předpokladu homogenního rychlostního pole uvnitř měřicí sekce tunelu, platí, že úhel otočení rychlostní sondy je roven úhlu náběhu proudu vzduchu lokálně v místě měření tlaku.

Po nalezení závislostí mezi tlaky a úhly s rychlostí následuje měření proudění vzduchu za motorem. V ideálním případě je toto proudění rotačně symetrické, avšak se ve skutečnosti na obtékaných plochách deformuje. V našem případě je jedinou překážkou stojan motoru, jehož vliv je zanedbatelně malý, a proto proudění můžeme považovat za symetrické.

Pro měření byl zvolen motor Dualsky XM4255EA-7 s vrtulí Mejzlik 18x6.

### 5.2 Měřicí přístroje a zařízení

Jako v předchozím experimentu se měření provádělo v testovací sekci aerodynamického tunelu na LÚ VUT s využitím stojanu VUT Stand (viz kap. 3.1). Mezi další využitá zařízení patří zejména traverz, Pitot-statická trubice a držák vlastní výroby pro realizaci jejího otáčení.

#### 5.2.1 Traverzovací systém

Jedná se o počítačově řízený systém, jenž umožňuje programování posuvu rychlostní sondy uvnitř tunelu ve dvou osách. Informace o poloze se rovněž ukládají do souboru s měřenými tlaky prostřednictvím řídicího software tunelu.



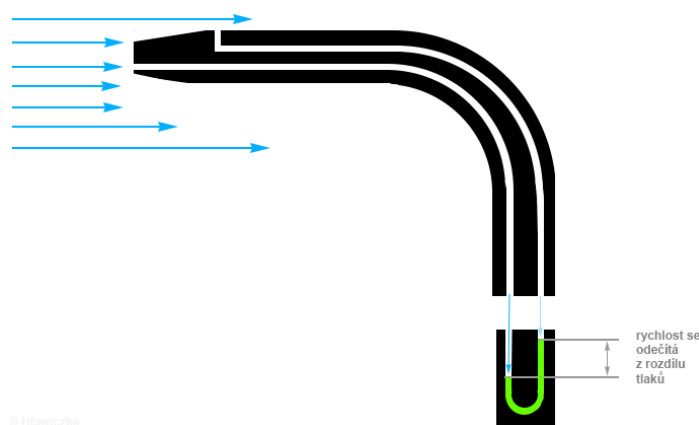
## 5.2.2 Rychlostní sonda

[10], [11]

Pro měření rychlosti proudění vzduchu se využívají speciální měřidla, tzv. anemometry. Ty můžeme dále dělit na rychlostní sondy a měřidla založené na silovém účinku proudu. Rychlostní sondy pracují na principu závislosti dynamického tlaku tekutiny na rychlosti proudění. Do této skupiny patří Pitotova trubice, Pitot-statická (Prandtlůva) trubice a víceotvorové sondy.

Pitotova trubice je jednou z nejjednodušších sond. Je tvořena trubicí zahnutou do pravého úhlu, jež je ponořena do proudícího média kolmo na směr proudění. Pomocí otvorů na konci trubice se snímá celkový tlak proudící tekutiny.

Pitot-statická, neboli Prandtlůva trubice je kombinace Pitotovy trubice se sondou pro měření statického tlaku. Tím pádem jsou měřeny jak celkový, tak statický tlak současně (přičemž, celkový tlak je součtem tlaků statického a dynamického).



Obrázek 29: Pitot-statická trubice [O9]

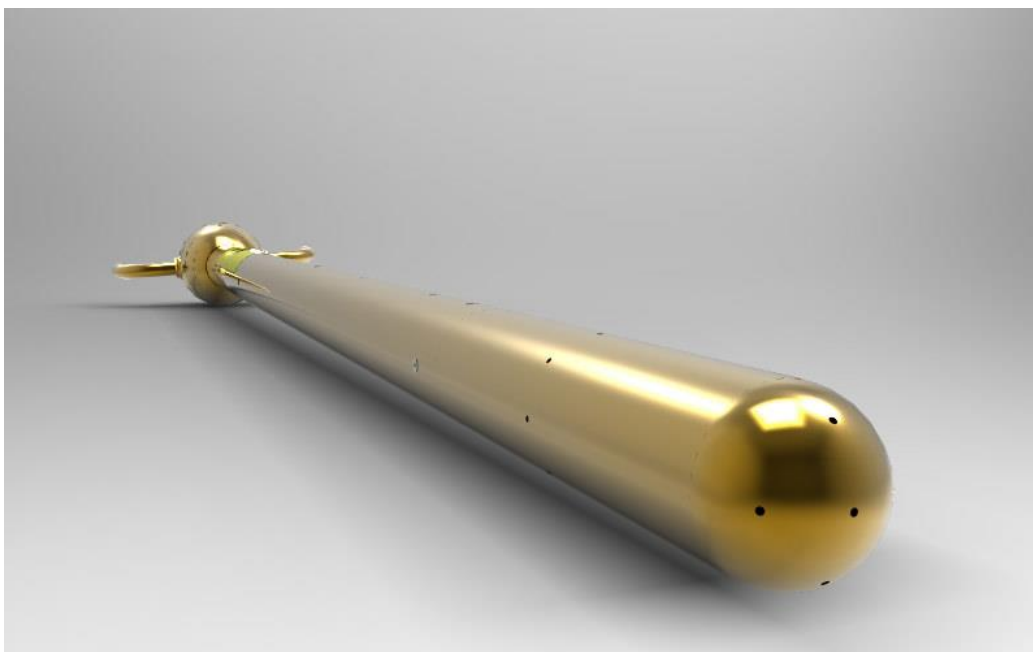
Pomocí vztahů (9) a (10) se vypočítá rychlost proudění vzduchu: [12]

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (9)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} \quad (10)$$

kde  $v$  je rychlost proudění [ $m/s$ ],  
 $p_c$  celkový tlak [ $Pa$ ],  
 $p_s$  je statický tlak [ $Pa$ ],  
 $p_d$  je dynamický tlak [ $Pa$ ],  
 $\rho$  je hustota vzduchu [ $1,225 \text{ kg/m}^3$ ].

Pro účely měření by však Pitot-statická trubice, zachycující jen 2 hodnoty tlaků, nestačila. Z toho důvodu se v daném měření použila víceotvorová sonda (konkrétně se jedná o sondu s kulovou hlavou, ve které je 5 otvorů pro snímání tlaků). Pomocí centrálního a čtyř obvodových otvorů se určí směr proudění, otvory pro statický tlak pak mají stejnou funkci jak u jednoduché sondy. Na obrázku 30 je pětioťvorová Pitot-statická trubice od výrobce Aventech Research Inc.

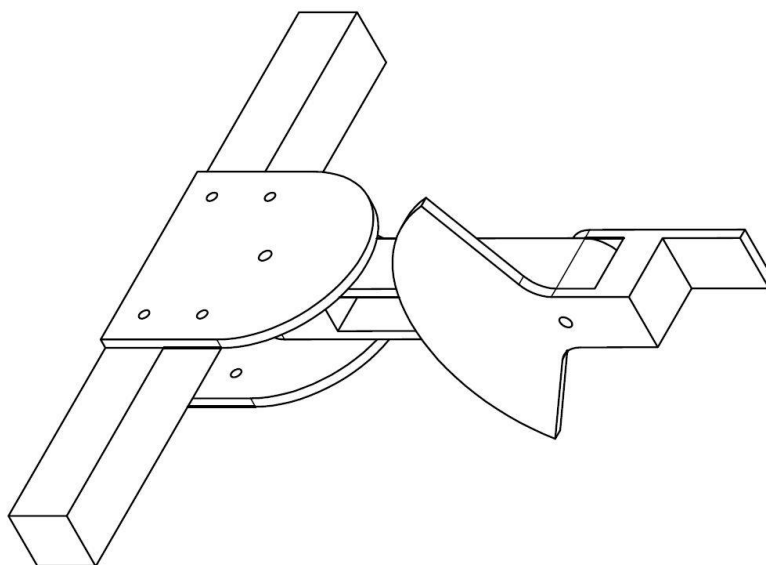


Obrázek 30: Pětiorovová Pitot-statická trubice (výrobce: Aventech Research Inc.) [O10]

## 5.3 Kalibrace rychlostní sondy

### 5.3.1 Návrh držáku

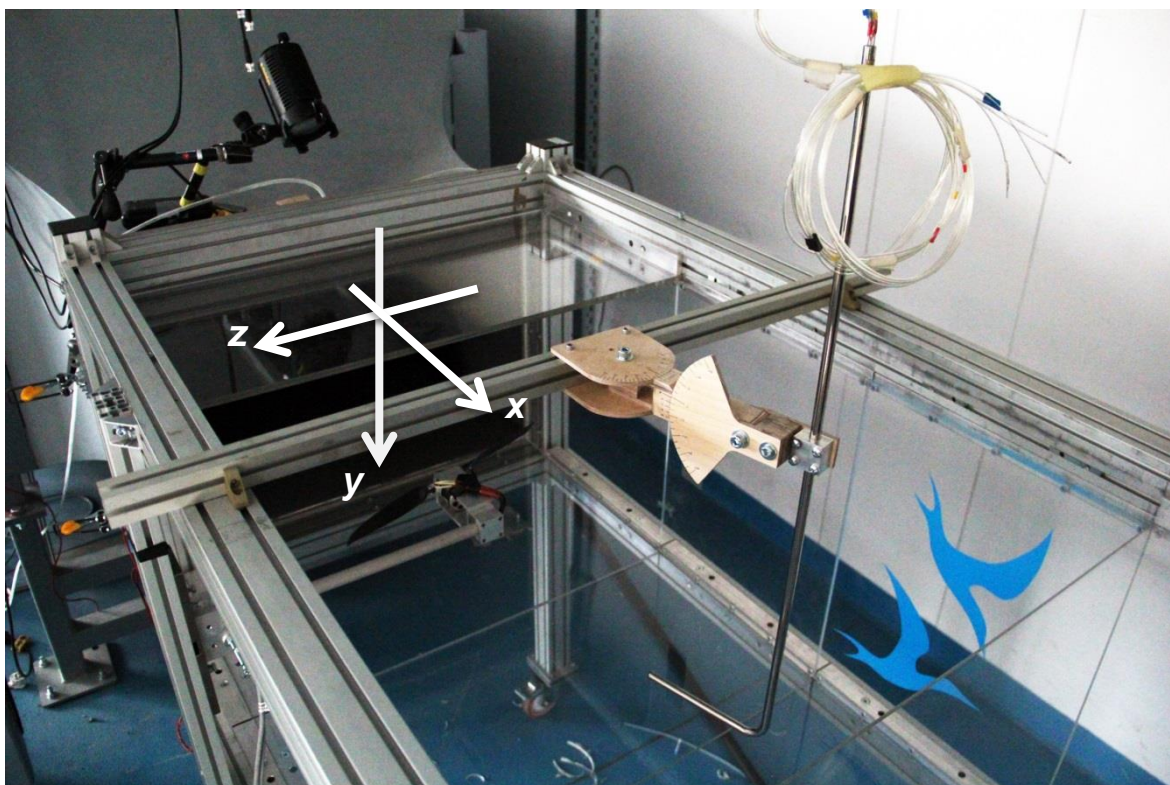
Při kalibračním měření zjišťujeme hodnoty tlaku v daných (předem známých) výchylkách sondy od počáteční polohy. Pro tento účel byl navržen a vyroben držák. Skládá se z pevného úchytu a dvou pohyblivých ramen postupně napojených na sebe. Úchyt slouží k namontování držáku k rámu testovací sekce tunelu. Obě ramena konají rotační pohyby ve dvou na sebe kolmých osách, čímž umožňují nastavení libovolného úhlu náběhu proudu (v mezích  $\pm 45^\circ$  v každé ose).



Obrázek 31: Držák rychlostní sondy



Obrázek 32: Stupnice držáku



Obrázek 33: Instalace držáku do tunelu, zvolený souřadnicový systém

## 5.3.2 Postup kalibrace

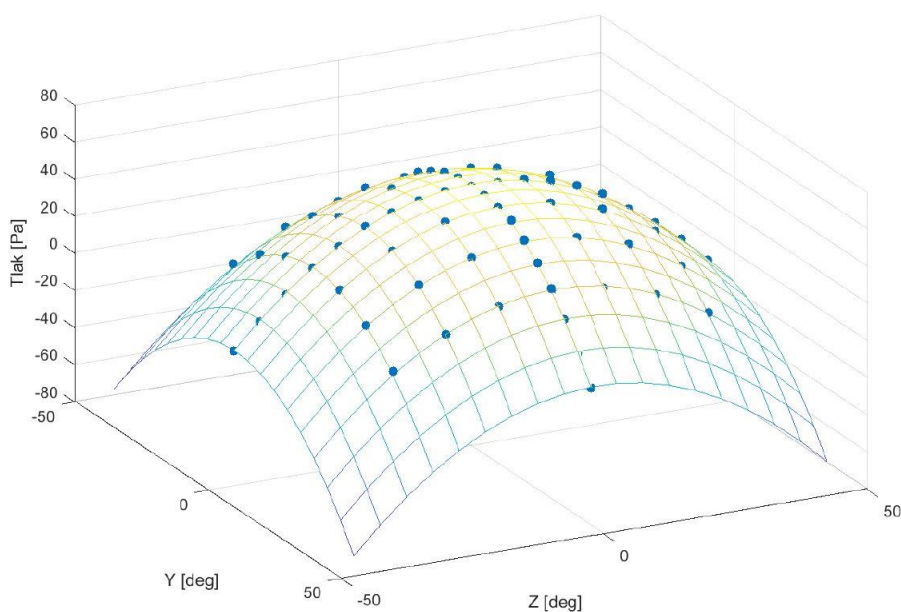
Hodnoty tlaků byly zaznamenány v určitém rozmezí výchylek a při různých rychlostech proudění v tunelu, viz tabulka 7. Při nulové rychlosti se všechny tlaky (kromě statického) rovnají nule.

Tabulka 7: Parametry kalibrace

Parametr	Jednotka	Velikost
Výchylky v obou osách	[°]	$\pm 30^\circ$ , krok $10^\circ$
Výchylky na každé ose zvlášť	[°]	$\pm 45^\circ$ , krok $5^\circ$
Rychlost proudění	[m/s]	8, 10, 12, 16, 20, 25

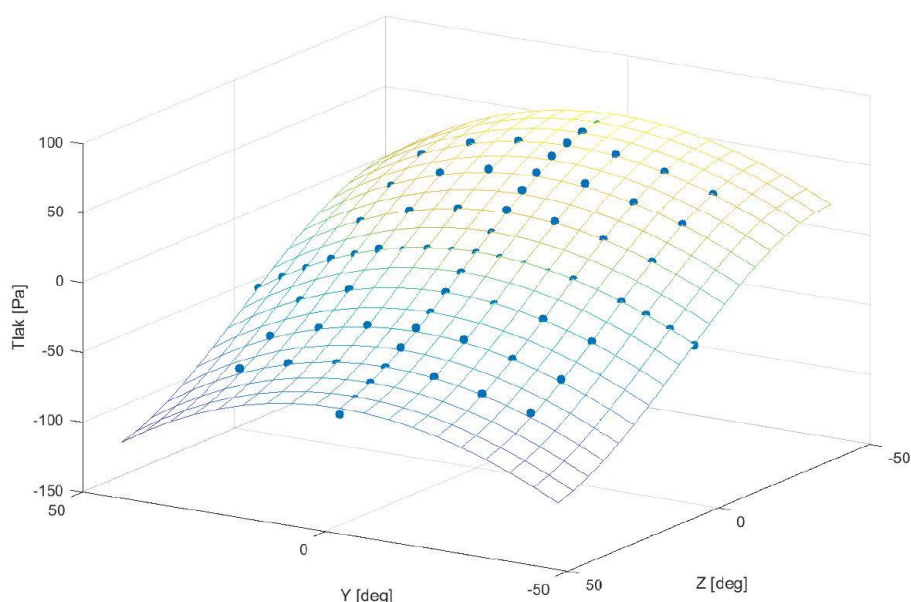
Pro orientaci byl zvolen souřadnicový systém označený na obrázku 33. Tím pádem se otáčení sondy provádělo kolem os y a z.

Pro kontrolu správnosti naměřená data byla vizualizována, viz obrázek 34 pro centrální otvor sondy, obrázek 35 pro otvor na pravé straně. Naměřenými hodnotami (modré body) jsou proloženy aproximační plochy.



Obrázek 34: Vizualizace tlaku v centrálním otvoru při 10 m/s





Obrázek 35: Vizualizace tlaku v pravém otvoru při 10 m/s

### 5.3.3 Návrh skriptu v MATLAB pro zpracování dat

Pro nalezení závislosti mezi tlaky a úhly natočení byl napsán skript „*Calibration.m*“ pro vytvoření modelu neuronové sítě<sup>10</sup>, kde vstupy jsou tlaky, a výstupy jsou úhly natočení a rychlost proudění. Součástí skriptu je iterační nalezení modelu s největší přesností odhadu. Na přiloženém CD se nachází zdrojový kód programu.

Hlavním autorem programu je pán Bc. Petr Zeman.

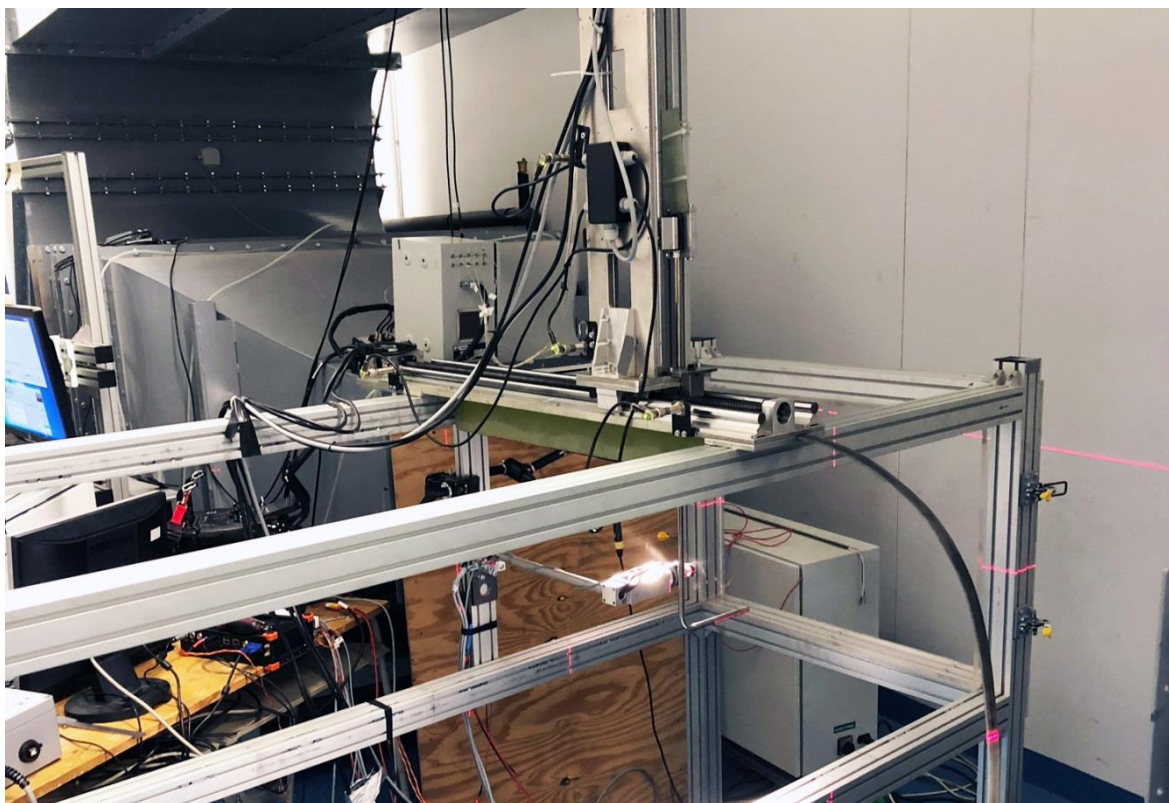
## 5.4 Postup měření

Pomocí traverzu se postupně změřily tlaky na celé měřené oblasti. Pro zlepšení přesnosti se tlaky v jednotlivých místech průměrovaly z několika záznamů. Důležité parametry měření jsou uvedené v tabulce 8.

Tabulka 8: Parametry měření rychlostního pole

Parametr/vybavení	Jednotka	Velikost/název
Motor		Dualsky XM4255EA-7
Vrtule		Mejzlik 18x6
Tah motoru	[N]	10
Měřená oblast daná intervaly souřadnic [x, y]	[mm]	[10 ÷ 800, 0 ÷ 250]

<sup>10</sup> Jedná se o výpočetní model používaný v umělé inteligenci, vhodný zejména pro úlohy aproximace a predikce. [14]



Obrázek 36: Postup měření

## 5.5 Zpracování dat, vyhodnocení výsledků

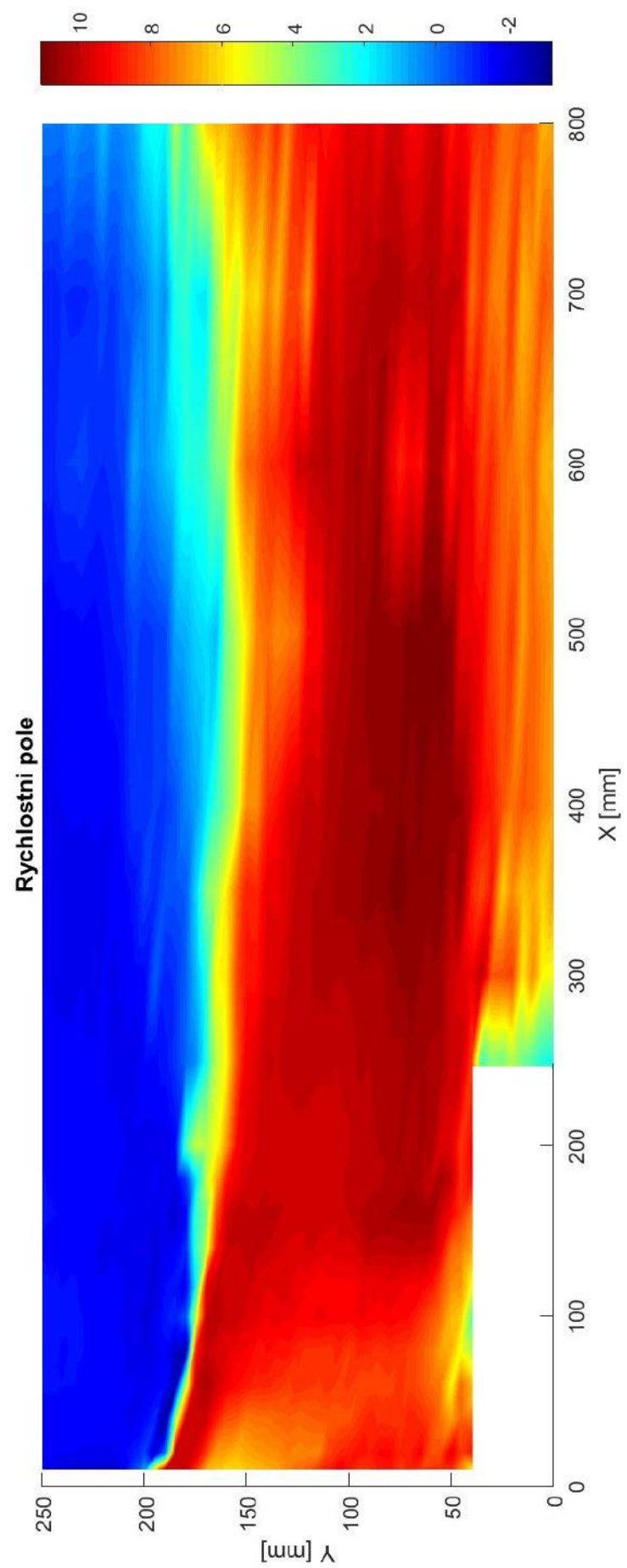
Pro automatické zpracování naměřených tlaků a vizualizaci rychlostního pole byl napsán skript „*Traverse.m*“ (viz příložené CD).

V první fázi jsou data načtena do proměnných pracovního prostředí a jsou jim přiděleny údaje o poloze traverzu (jež odpovídají posunutím ve směru os  $x$  a  $y$ ). Následně pomocí modelu vytvořeného v předchozí části, jsou z hodnot tlaků v místech záznamů zjišťovány velikosti úhlů náběhu (dle již zmíněné konvence – otáčení kolem os  $y$  a  $z$ ) a rychlost proudu. V poslední části programu probíhá grafický výstup.

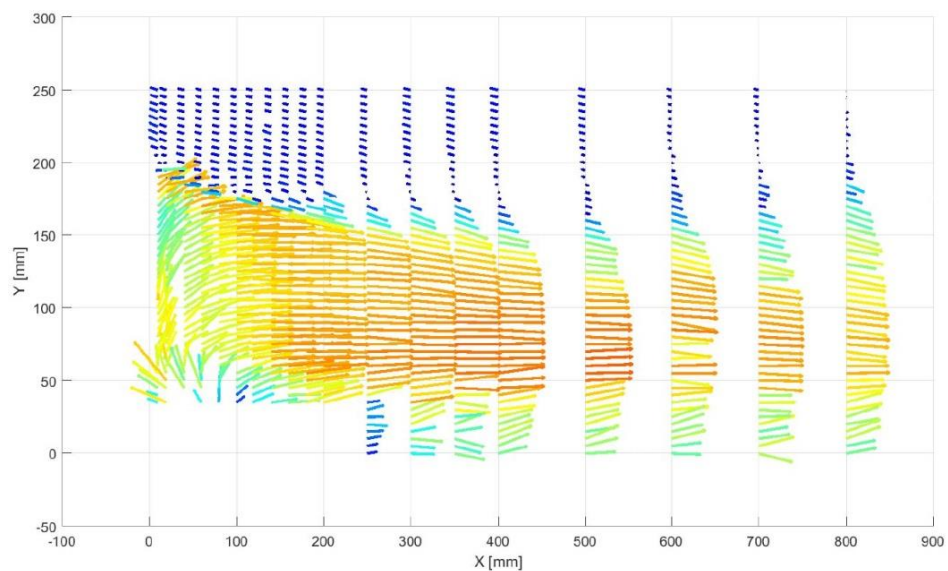
Na obrázku 37 můžeme vidět mapu rozložení rychlosti proudění po měřené oblasti, kde velikost rychlosti je dána barvou a je udávána v m/s.

Na obrázcích 38, 39, 40 je zobrazení rychlostí pomocí vektorového pole (velikosti vektorů nejsou v měřítku, barvy jsou pouze ilustrační).

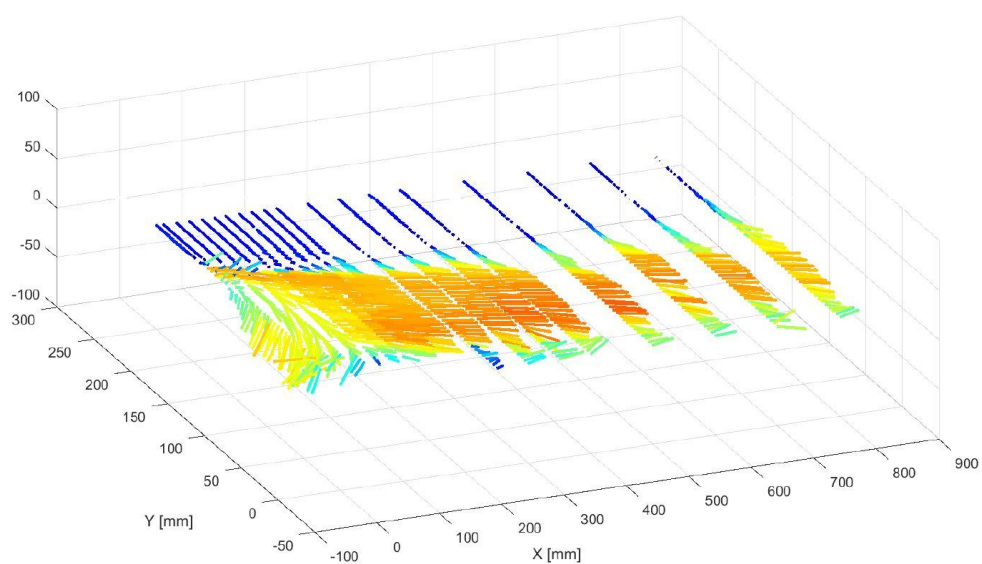
Z naměřených dat je dobře patrné zúžení proudu za pracující vrtulí a stáčení proudu. Naměřené charakteristiky budou využity v navazujících projektech bezpilotních prostředků na Leteckém ústavu.



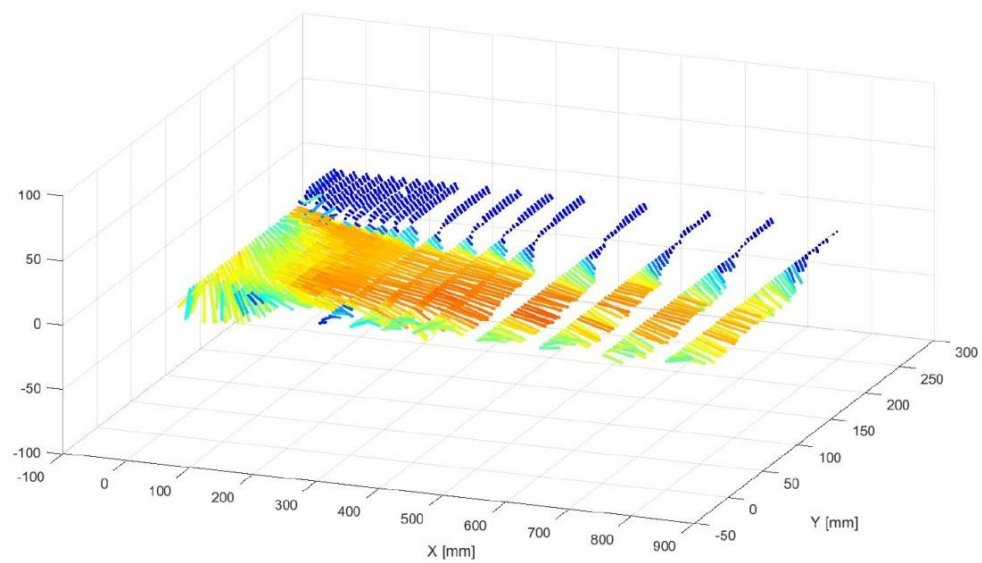
Obrázek 37: Mapa rychlostního pole



Obrázek 38: Vizualizace pomoci vektorů rychlosti



Obrázek 39: Vizualizace pomoci vektorů rychlosti



Obrázek 40: Vizualizace pomoci vektorů rychlosti



## 6 Závěr

Na začátku práce byla provedena rešerše v oblasti elektrických pohonných soustav používaných pro pohon bezpilotních prostředků.

V druhé části byla provedena série měření výkonnostních charakteristik vybraných pohonných systémů. Pro zpracování dat z experimentu byly vytvořeny skripty v prostředí MATLAB. Při vyhodnocování výsledku experimentu byly postupně vybírány konfigurace pohonů s nejlepšími hodnotami efektivity. V první řadě byly vyneseny do grafů závislosti efektivity na tahu pro všechny měřené kombinace motoru a vrtule – bylo vybráno několik nejefektivnějších konfigurací. Dále bylo provedeno porovnání efektivity u vrtulí se stejným průměrem a různými stoupáními. Byla prokázána vhodnost použití vrtulí s větším stoupáním při vyšších rychlostech letu. Pro dvě nejlepší kombinace byly sestrojeny grafy efektivity při různých rychlostech a napětích. Bylo ukázáno, že obecně při nižším napájecím napětí má pohon obecně vyšší efektivitu, ale nižší maximální tah. V poslední části experimentu byl doporučen nejvhodnější pohonný systém: motor Dualsky XM5010MR-9 v kombinaci s vrtulí Aero-naut CamCarbon 14x12 při napájecím napětí 14,8 V (4S).

Poslední část práce je věnována zjištění charakteristik a vizualizaci proudění vzduchu za vrtulí. V rámci daného experimentu bylo provedeno kalibrační měření pětivotrové Pitot-statické trubice. V souvislosti s tím byl navržen program pro nalezení závislosti mezi měřenými tlaky a vektory rychlosti proudění. Pro vybraný pohonný systém bylo provedeno měření proudového pole za vrtulí, obdržená data byla zpracována. Hodnoty rychlosti proudění za vrtulí byly vizualizovány pomocí mapy a vektorového pole rychlosti.

## 7 Použité zdroje

### 7.1 Literární a internetové zdroje

- [1] Pravidla létání: Letecký předpis L2, Doplněk X [online]. 2014 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- [2] ZEMAN, P. *Rozbor koncepcí multirotorových bezpilotních prostředků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Dvořák.
- [3] Modelářské elektromotory. RC-ZOOM [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.rc-zoom.cz/modelarske-elektromotory-1-dil/>.
- [4] E. EEKHOFF, "Brushless Motor KV Constants Explained". *LearningRC.com* [online]. 2015 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://learningrc.com/motor-kv/>.
- [5] SAMPATH, Raam Sundhar. An Investigation into UAV Scale Propellers. Southampton, 2017, 122 s. Diplomová práce. University of Southampton, Faculty of engineering and environment. Vedoucí práce Dr.S.D.Prior.
- [6] CURTISS-WRIGHT CORPORATION. *Propeller Theory*. Caldwell, New Jersey, 1944, 33 s. Dostupné také z: <http://www.bestinflight.net/doclibrary/propellertheory.pdf>.
- [7] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-659-1.
- [8] GUDMUNDSSON, Snorri. *General aviation aircraft design: applied methods and procedures*. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-397308-5.
- [9] CAMcarbon Klappluftschrauben. *AERO-NAUT* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.aero-naut.de/produkte/flugmodellbau/flugzubehoer/luftschauben/camcarbon-klappluftschraube/>
- [10] CHOVANEC, R. Testování snímače proudění vzduchu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 41s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Vdoleček, CSc.
- [11] SLÁDEK, Zdeněk a František VDOLEČEK. *Technická měření*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1992, 220 s. ISBN 80-214-0414-0.
- [12] BENSON, Tom. Pitot tube. NASA [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitot.html>
- [13] Turbulence intensity. *CFD Online* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_intensity](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity)
- [14] Neuronové sítě. Mendelová Univerzita v Brně [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=21471](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=21471)

## 7.2 Obrazová dokumentace

- [O1] TMotor MT2216. In: *RobotShop* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.robotshop.com/en/tmotor-uav-brushless-motor-mt2216-900kv.html>.
- [O2] KDE5215XF-330 Brushless Motor. In: *KDE Direct* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.kdedirect.com/products/kde5215xf-330>
- [O3] ZEMAN, P. *Rozbor koncepcí multirotorových bezpilotních prostředků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Dvořák.
- [O4] Průměr vrtule. In: *RobotShop* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.robotshop.com/blog/en/files/propeller-diameter.jpg>.
- [O5] Stoupání vrtule. In: *RobotShop* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.robotshop.com/blog/en/files/propeller-pitch-500x500.jpg>.
- [O6] DYTRYCH, Jan. Aerodynamika vrtule [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/cz281908/obsah2/aerodyn.htm>
- [O7] Introduction To Electronic Speed Control (ESC) Working and Applications. In: *ElProCus* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/electronic-speed-control-esc-working-applications/>
- [O8] CAMcarbon Klappluftschauben. In: *AERO-NAUT* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.aero-naut.de/produkte/flugmodellbau/flugzubehoer/luftschauben/camcarbon-klappluftschraube/>
- [O9] Pitotovy trubice - Jak pomáhají v mapování aerodynamiky vozů F1? In: *f1news.autoroad.cz* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://f1news.autoroad.cz/technika/42191-pitotovy-trubicejak-pomahaji-v-mapovani-aerodynamiky-vozu-f1/>
- [O10] Air Data Probe – Sting Mount. In: *Aventech Research Inc.* [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: [http://aventech.com/products/sm\\_adp.html](http://aventech.com/products/sm_adp.html)

## 8 Seznam použitých zkratk a symbolů

$C_P$	$[-]$	Součinitel výkonu
$C_Q$	$[-]$	Součinitel krouticího momentu
$C_T$	$[-]$	Součinitel tahu
$P_M$	$[W]$	Výkon na hřídeli motoru
$P_V$	$[W]$	Využitelný výkon
$T_V$	$[N]$	Tah motoru
$p_c$	$[Pa]$	Celkový tlak
$p_d$	$[Pa]$	Dynamický tlak
$p_s$	$[Pa]$	Statický tlak
$D$	$[m]$	Průměr vrtule
$J$	$[-]$	Rychlostní poměr
$P$	$[m]$	Stoupání vrtule
$Q$	$[Nm]$	Krouticí moment na hřídeli motoru
$R$	$[m]$	Poloměr vrtule
$V$	$[m/s]$	Rychlost letadla
$n$	$[s^{-1}]$	Otáčky motoru
$v$	$[m/s]$	Rychlost proudění v tunelu
$\beta$	$[^\circ]$	Úhel nastavení vrtule
$\eta$	$[-]$	Účinnost vrtule
$\rho$	$[kg/m^3]$	Hustota
BLDC		Bezkartáčový stejnosměrný (elektromotor)
KV		Otáčky za minutu na jeden volt v nezátíženém stavu
RPM		Otáčky za minutu
PWM		Pulzně šířková modulace
UA		Bezpilotní letadlo
UAS		Bezpilotní systém

## 9 Seznam příloh

- A. CD
- B. Specifikace motorů
- C. Grafy závislosti efektivity na tahu pro vybrané kombinace.

## 10 Přílohy

### A. CD

K bakalářské práci přikládám CD se zdrojovými kódy navržených v rámci této práce skriptů MATLAB. Zařazení skriptů je následující:

- Složka „*mereni\_1\_zpracovani\_dat*“: soubory „*DataProcess.m*“ a „*DataVizualize.m*“.
- Složka „*mereni\_2\_kalibrace\_sondy*“: soubor „*Calibration.m*“.
- Složka „*mereni\_2\_traverzovani*“: soubor „*Traverse.m*“.

Mimo uvedené soubory se ve složkách nacházejí další skripty funkcí, datové složky.

Skripty byly napsány v programu MATLAB verze R2017a.

## B. Specifikace motorů

Parametr	Jednotka	Velikost	
Motor		<b>XM4608MR-8.5</b>	<b>XM5010MR-9</b>
RPM/V (KV)	$[min^{-1}V^{-1}]$	690	390
Hmotnost bez kabelů	$[g]$	100	114
Průměr	$[mm]$	46	50
Délka	$[mm]$	27	31
Průměr hřídele	$[mm]$	4.0, 5.0	4.0, 6.0
Rozteč montážních otvorů	$[mm]$	25/25	25/25
Drážky, póly	$[-]$	24, 22	24, 28
Proud naprázdno ( $I_0$ ) @10V	$[A]$	1	0.55
Odpor ( $R_t$ )	$[m\Omega]$	59	92
„Cestovní“ výkon (8 mins)	$[W]$	232	305
Max. proud (15s)	$[A]$	29	25
Max. výkon (15s)	$[W]$	423	555
Hmotnost kvadrokoptéry	$[kg]$	2.6	3.4
Hmotnost hexakoptéry	$[kg]$	3.9	5.1

### C. Grafy závislosti efektivity na tahu pro vybrané kombinace.

